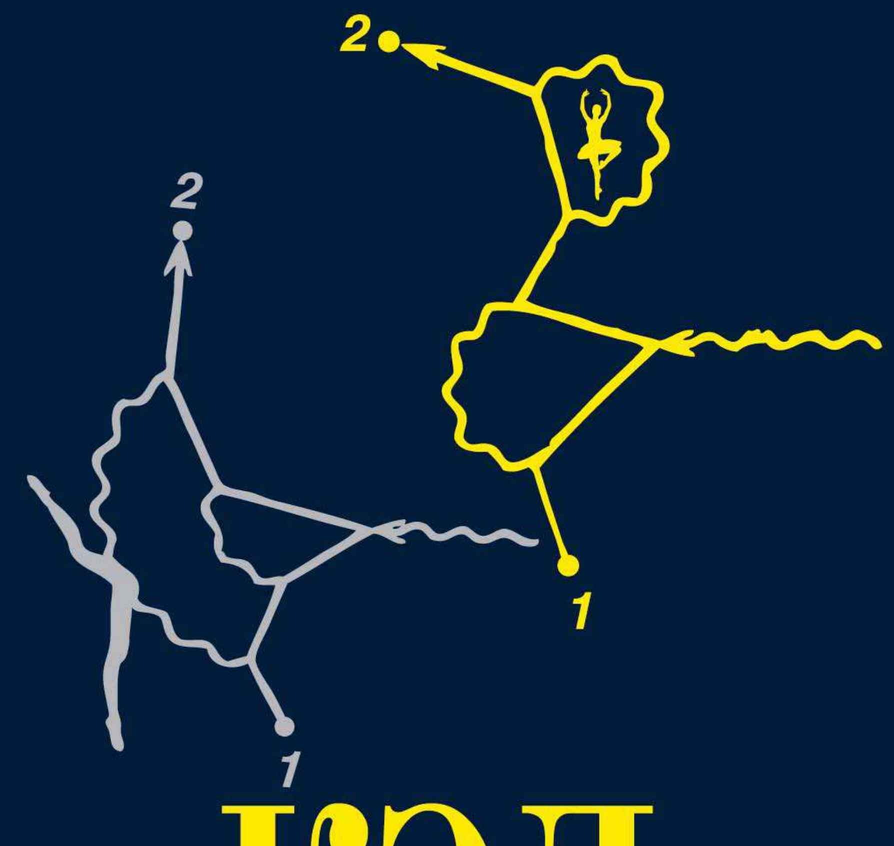
РИЧАРД ФЕЙНМАН



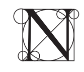
КЭД

СТРАННАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА И ВЕЩЕСТВА

РИЧАРД
ФЕЙНМАН

КЭД

СТРАННАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА И ВЕЩЕСТВА



Издательство АСТ
Москва

УДК 53(092)(73)
ББК 22.3г
Ф31

Серия «Наука: открытия и первооткрыватели»

Richard P. Feynman
QED: THE STRANGE THEORY OF LIGHT AND MATTER

Перевод с английского *С. Г. Тиходеева*, *О. Л. Тиходеевой*

Под редакцией действительного члена Российской академии наук
Л. Б. Окуня

Серийное оформление и компьютерный дизайн *В. А. Воронина*

Печатается с разрешения издательства Princeton University Press
при содействии литературного агентства Synopsis.

Фейнман, Ричард.

Ф31 КЭД — странная теория света и вещества / Ричард Фейнман ; [пер. с англ. С. Г. Тиходеева, О. Л. Тиходеевой]. — Москва : Издательство АСТ, 2018. — 192 с. – (Наука: открытия и первооткрыватели).

ISBN 978-5-17-112577-6

В основу этой книги легли знаменитые лекции Ричарда Фейнмана, прочитанные им в Калифорнийском университете.

В этих лекциях прославленный физик рассказывает о квантовой электродинамике — теории, в создании которой принимал участие он сам, — рассказывает простым и доступным языком, понятным даже самому обычному читателю.

Не зря даже о самом первом, принстонском издании «КЭД» критики писали: «Книга, которая полностью передает захватывающий и остроумный стиль Фейнмана, сделавшего квантовую электродинамику не только понятной, но и занимательной».

УДК 53(092)(73)
ББК 22.3г

ISBN 978-5-17-112577-6

Уникальный автограф знаменитой диаграммы Фейнмана, подписанный самим Фейнманом; изображение любезно предоставил Дж. М. Пасачофф (Jay M. Pasachoff, Fields Memorial Professor of Astronomy at Williams College). Диаграмма была изображена на первых страницах его экземпляра первого издания *КЭД*.

ПРЕДИСЛОВИЕ К ЗАРУБЕЖНОМУ ИЗДАНИЮ 2006 ГОДА

История того, как мы поняли, что такое свет, — это захватывающая драма, полная и неожиданностей, и поворотов судьбы.

Фотон — наиболее часто наблюдаемая из всех элементарных частиц: зайдите солнечным днем в пыльную комнату с одним маленьким окном и вы увидите сонм пересекающих комнату маленьких козявок. Ньютон совершенно естественно предположил, что свет состоит из потока частиц («корпускул»), но уже он испытывал некоторые сомнения; ведь даже в семнадцатом столетии можно было наблюдать дифракцию света. В конце концов дифракция и другие эффекты, казалось бы, убедительно показали, что свет является электромагнитной волной. В квинтэссенции физики девятнадцатого века, уравнениях электромагнетизма Максвелла, свет рассматривался исключительно как волна. Потом появился Эйнштейн и объяснил фотоэффект, запостулировав, что свет есть сумма маленьких порций («квантов») энергии. Тут возникли и слово «фотон», и квантовая теория света. (Я не буду здесь отвлекаться и обсуждать знаменитое недовольство Эйнштейна квантовой механикой, хоть он и способствовал ее рождению.) Тем временем с 1920-х по 1940-е годы физики весьма глубоко поняли квантовое поведение материи («атомов»). При этом самым удивительным оказалось то, что квантовое поведение света и его взаимодействия с электронами не поддавались усилиям сильнейших и ярчайших физиков, таких как Поль Дирак и Энрико

Ферми. Физике пришлось дожидаться появления трех молодых людей — Фейнмана, Швингера и Томонаги, получивших заряд как оптимизма, так и пессимизма, возможно благодаря Второй мировой войне, — чтобы возникла правильная формулировка квантовой электродинамики, или КЭД.

Ричард Фейнман (1918—1988) был не только экстраординарным физиком, но экстраординарной и нетривиальной личностью. Подобных ему теоретическая физика не видела ни до, ни после. Иногда в свободную минуту физики-теоретики любят сравнить вклад в науку Фейнмана и Швингера — двух блестящих еврейских мальчиков из Нью-Йорка и почти ровесников. Это совершенно никчемный спор, но факт тот, что в отличие от застенчивого и скромного Джулиана Швингера (впрочем, за маской отстраненности скрывался человек милый и добросердечный) Дик Фейнман был полным экстравертом, человеком-легендой. Со своими барабанами бонго, танцовщицами и другими атрибутами тщательно выстроенного имиджа, который с энтузиазмом поддерживался легионом почитателей, он, безусловно, стал самым популярным физиком-теоретиком после Эйнштейна.

Известно, что блестящий русский физик Лев Ландау использовал логарифмическую шкалу для оценки уровня физиков-теоретиков, с Эйнштейном на вершине. Так же хорошо известно, что после создания теории фазовых переходов Ландау передвинул себя вверх на половину деления. У меня тоже есть своя шуточная шкала, куда я помещаю известных мне лично или по работам физиков-теоретиков. Увы, большинство физиков-теоретиков невыносимо скучны и в этой логарифмической шкале занимают место неподалеку от минус бесконечности. Я бы поместил Шрендингера (о котором чуть ниже) на вершину, но Фейнман, очевидно, на следующей под ним ступеньке. Не скажу, в каком месте шкалы я помещаю себя, но стараюсь не быть занудой по мере отпущенного мне таланта и возможностей.

Но каким шутником был Фейнман! В начале моей карьеры Фейнман пригласил меня сходить вместе в ночной клуб. Один из коллег Фейнмана объяснил мне, что такое приглашение показывает, что он воспринимает меня как физика достаточно серьезно. Но как я ни старался изложить Фейнману свои соображения о теории Янга—Миллса, он интересовался лишь моим мнением о ножках танцовщиц на сцене. Разумеется, никто не будет создавать себе кумира из балбе-

са-физика, если он только играет на барабане и интересуется танцовщицами. Так что моя шкала на самом деле — это блеск, *умноженный* на талант, — или шкала Ландау с дополнительным сомножителем — блеском, — где акции Эйнштейна падают, а Ландау — растут (он и сыграл несколько хороших шуток, пока не попал под удар КГБ).

Теперь, спустя примерно тридцать лет после того посещения ночного клуба, я польщен тем, что Ингрид Гнерлих из «Принстон юниверсити пресс» попросила меня написать предисловие к переизданию 2006 г. знаменитой книги Фейнмана «КЭД: странная теория света и вещества». Прежде всего признаюсь: я никогда не читал этой книги. Когда она появилась в 1985 году, я только что закончил писать свою первую популярную книгу по физике «Страшная симметрия»* и старался не читать другие популярные книги по физике из опасения, что они повлияют на мой стиль. В результате я прочел присланную Ингрид книгу свежим взглядом и с огромным удовольствием. Я бесконечно ею наслаждался, кратко записывая свои соображения и замечания по мере чтения.

Я сильно пожалел, что не прочитал эту книгу раньше, поскольку это вовсе не популярная книга по физике в обычном смысле. Стив Вайнберг, предложивший мне в 1984 году написать популярную книгу по физике и познакомивший меня со своим издателем в Нью-Йорке, дал мне полезный совет. Он сказал, что большинство физиков, пишущих такие книги, не могут устоять перед искушением все объяснять, в то время как читатель хочет получить лишь иллюзию понимания и подхватить несколько словечек, чтобы блеснуть в обществе.

Я думаю, что мнение Вайнберга, пусть несколько циничное, в целом верное. Вот, например, феноменальный успех «Краткой истории времени» Хокинга (которой я не читал в соответствии со

---

* Fearful Symmetry. The Search for Beauty in Modern Physics, 1st ed. published by Macmillan, 1986; 2nd ed. Princeton University Press, 2006. Книга не переводилась на русский. Данное предисловие является очевидной рекламой ее переиздания в PUP (как и учебника того же автора, см. ниже). В названии используется цитата из знаменитого стихотворения Уильяма Блейка «Тигр» (Tyger! Tyger! // burning bright // In the forests of the night, // What immortal hand or eye // Could frame thy **fearful symmetry**?). — *Примеч. пер.*

своими принципами, описанными выше). Один мой бывший коллега по Калифорнийскому университету, весьма известный профессор, теперь занимающий кафедру в Оксфорде, показал мне однажды фразу из этой книги. Мы вдвоем пытались понять ее смысл и не смогли. И, наоборот, я хочу уверить всех озадаченных читателей, что каждое предложение в этой книге, сколь бы странным оно ни казалась, имеет смысл. Но вы должны внимательно обдумывать каждое предложение и изо всех сил стараться понять, что же хотел сказать Фейнман, прежде чем продвигаться дальше. В противном случае я гарантирую, что вы безнадежно запутаетесь. И дело в странности физики, а не в изложении. В конце концов, заглавие обещает «странную теорию».

Поскольку Фейнман есть Фейнман, он выбрал путь, полностью противоположный совету Вайнберга (совету, которому я тоже не следовал полностью; см. ниже мое замечание про теорию групп). В предисловии от автора Фейнман критикует популярные книги по физике за то, что «кажущаяся простота достигается за счет описания чего-то совсем другого, за счет существенного искажения того, что берутся описывать». Напротив, он принял вызов описать КЭД для обычного читателя без «искажения истины». Так что не считайте эту книгу типичной популярной книгой по физике. Но это и не учебник. Это редкий пример гибрида.

Чтобы пояснить, какого рода эта книга, я воспользуюсь собственной аналогией Фейнмана, слегка ее модифицировав. Согласно Фейнману, у вас есть два пути, чтобы изучить КЭД: либо пройти полный курс семилетнего образования по физике, либо прочесть эту книгу. (Его цифра несколько завышена; в наши дни способный выпускник средней школы с надлежащим руководством смог бы, вероятно, преодолеть этот путь быстрее чем за семь лет.) Итак, у вас нет выбора, не правда ли? Конечно, вам надо прочесть эту книгу! Даже если вы будете обдумывать, как я вам советую, каждую фразу, это не займет и семи недель, не говоря уж о семи годах.

В чем же разница между двумя способами? Я предлагаю такую аналогию: верховный жрец майя объявляет, что за определенную плату он готов научить вас, обычного Джо или Джейн, среднего жителя-майя, умножать два числа, скажем, 564 на 253. Он попросит вас сначала выучить таблицу умножения до 9 9, затем скажет вам взять последние цифры справа в числах, которые надо перемножить,

именно, 4 и 3, и назвать число на пересечении 4-го ряда и 3-й колонки таблицы умножения. Вы назовете 12. Затем вы узнаете, что нужно записать 2 и «держать в уме» 1, что бы это ни значило. Затем вы должны будете назвать число на пересечении 6-го ряда с 3-й колонкой, то есть 18, к которому вы должны будете добавить число, которое «у вас в уме». Разумеется, еще год вам придется изучать, как «складывать». Ну ладно, вы уже поняли мою мысль. Это то, что вы получите, заплатив за образование в престижном университете.

Вместо этого мудрец по имени Фейнман обращается к вам со словами: «Шшш, если вы умеете считать, вам совсем не нужно учиться этим премудростям насчет держания в уме и складывания. Все, что вам нужно — это разжиться 564 банками. Затем вам надо положить в каждую банку по 253 камешка. Затем вам надо высыпать все камешки в одну большую кучу и пересчитать. И вы получите ответ!»

Так что Фейнман не только научит вас умножать, он даст вам глубокое понимание того, чем же занимаются верховные жрецы и их студенты, то есть те, кто скоро получат PhD степени в престижных университетах! С другой стороны, если вы научитесь умножать способом Фейнмана, вам не получить должности даже бухгалтера. Если ваш босс попросит вас перемножать весь день большие числа, вы скоро выдохнетесь, а бывшие студенты университета верховного жреца оставят вас глотать пыль далеко позади.

Написав и учебник («Quantum Field Theory in a Nutshell»*, в дальнейшем «В двух словах»), и две популярные книги по физике (в том числе «Fearful Symmetry», в дальнейшем «Страшная»), я чувствую себя достаточно компетентным, чтобы советовать вам, что читать. (Между прочим, и «В двух словах» и «Страшная» были опубликованы тем же издательством «Принстон юниверсити пресс», что и данная книга.)

Давайте разделим читателей этого предисловия на три типа: 1) студентов, которых эта книга может сподвигнуть на изучение КЭД, 2) любознательных непрофессионалов, интересующихся КЭД, и 3) физиков-профессионалов, как я сам.

---

* Quantum Field Theory in a Nutshell. 1st (2003) & 2nd (2010) ed. Princeton University Press. В русском переводе «Квантовая теория поля в двух словах», НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»(2009). — *Примеч. пер.*

Если вы принадлежите к 1-му типу, вы настолько загоритесь, прочитав эту книгу, что вам захочется немедленно взяться за изучение учебника по квантовой теории поля (и это может быть «В двух словах»!). Добавлю, что в наши дни КЭД считается относительно простым примером квантовой теории поля. Написав «В двух словах», я уверен, что по-настоящему яркий студент будет иметь хорошие шансы разобраться в квантовой теории поля, и Фейнман наверняка бы со мной согласился.

Однако, как и в приведенной выше аналогии, чтение этой книги ни в коем случае не превратит вас в профессионала. Вы должны будете изучить то, что Фейнман называет «эффективными приемами» перемножения чисел. Несмотря на заявленное Фейнманом желание объяснить все с нуля, он явно теряет обороты по мере продвижения вперед. Например, на стр. 102 и на рис. 55 он лишь описывает зависимость P(A—B) от «интервала I», и вам ничего не остается, кроме как принять его слова на веру. В книге «В двух словах» это все выведено. То же самое относится и к E(A—B), описанной в сноске на стр. 105.

Если вы принадлежите ко 2-му типу, проявите настойчивость, и вы будете вознаграждены, поверьте мне. Не торопитесь. Даже если вы осилите только первые две главы, вы познаете многое. Почему эту книгу так трудно читать? Вернемся к аналогии про майя: это как если бы вы пытались научить кого-то умножению посредством банок и камешков, а тот не знает даже, что такое банка или камень. Фейнман пытается выкрутиться, объясняя вам, что каждый фотон переносит маленькую стрелку и как перемножать и складывать эти стрелки, растягивая их и поворачивая. Все это очень сбивает с толку; вы должны следить чрезвычайно внимательно, не пропуская ни малейшей детали. Между прочим, маленькие стрелочки — это просто комплексные числа, и если вы уже знаете про комплексные числа (и банки, и камешки), обсуждение могло бы стать не таким запутанным. Или, допустим, вы один из тех типичных непрофессионалов, описанных Вайнбергом, которому достаточно «иллюзии понимания чего-то». В таком случае вам больше подошла бы «нормальная» популярная книга по физике. Опять аналогия с майя: нормальная популярная книга по физике не затруднит вас ни изучением таблицы умножения и «держанием в уме», ни банками и камешками. Там, возможно, будет просто сказано, что если есть два

числа, верховные жрецы знают, как из них сделать третье число. На самом деле, издатели популярных книг по физике обычно настаивают на такого рода объяснениях, чтобы только не распугать покупателей (см. продолжение ниже).

Наконец, если вы относитесь к 3-му типу, вас ожидает большое удовольствие. Даже будучи квантово-полевым теоретиком и разбираясь в том, что делает Фейнман, я получаю большое удовольствие, читая его объяснение хорошо знакомого явления ослепительно оригинальным и незнакомым способом. Я наслаждаюсь, читая объяснение Фейнмана, почему свет распространяется по прямой или как на самом деле работает фокусирующая линза: «природу можно «обмануть»», замедлив свет, идущий по определенным путям, так что все стрелки повернутся на один и тот же угол!

Теперь я объясню вам, чем Фейнман отличается от большинства профессоров физики. Попробуйте-ка попросить профессора физики объяснить, почему для понимания отражения света от стеклянной пластинки достаточно рассмотреть отражение только от передней и задней поверхностей? Лишь немногие из них знают ответ. Это объясняется не тем, что у профессоров физики нет необходимых знаний, а тем, что просто никому никогда не приходило в голову задать такой вопрос. Они просто учатся по стандартному учебнику Джексона, сдают экзамен и следуют дальше. Фейнман — это тот надоедливый мальчишка, который все задает и задает вопросы: почему, ПОЧЕМУ, ПОЧЕМУ!

В соответствии с тремя типами читателей (честолюбивый студент, интеллигентный непрофессионал, профессионал) имеются и три типа книг по физике (не в точном соответствии один к одному): учебники, популярные книги и, наконец, то, что можно назвать «сверхсложные популярные книги по физике». Эта книга — редкий пример третьего типа, притом в некотором смысле она промежуточная между учебником и популярной книгой. Почему примеры таких книг столь редки? Да потому, что «сверхсложные популярные книги по физике» пугают издателей почти до полусмерти. Хокинг высказал мысль, что каждое уравнение сокращает вдвое продажи популярной книги. Не отвергая справедливости этого утверждения в общем, я бы хотел, чтобы издатели не давали себя запугать так легко. Дело не в количестве уравнений, а в том, может ли популярная книга содержать честное изложение сложных понятий. Когда я писал «Страшную», я

думал, что для того, чтобы обсуждать симметрию в современной физике, очень важно объяснить, что такое теория групп. Я попытался упростить рассказ при помощи маленьких значков: квадратиков и кружочков с буквами. Но редактор заставил меня сначала многократно упрощать мои рассуждения, так что от них практически ничего не осталось, а затем перенести большую часть оставшегося в приложение. С другой стороны, авторитет Фейнмана не сравним с таковым у большинства авторов-физиков.

Давайте вернемся к трудным местам книги Фейнмана. У многих читателей, имеющих хотя бы общее представление о квантовой физике, может возникнуть совершенно оправданное удивление по поводу, например, отсутствия волновой функции, которая играет столь существенную роль в других популярных обсуждениях квантовой физики. Квантовая физика — это головоломка; как сказал один остряк: «Когда есть квантовая физика, кому нужны наркотики?» Наверное, читателю хватит ломать голову. Я объясню.

Почти одновременно, но независимо друг от друга, Эрвин Шредингер и Вернер Гейзенберг изобрели квантовую механику. Шредингер, чтобы описать движение электрона, предложил волновую функцию, подчиняющуюся уравнению с частными производными, теперь называемому уравнением Шредингера. А Гейзенберг, напротив, мистифицировал окружающих, говоря про операторы, действующие на то, что он назвал «квантовыми состояниями». Он также провозгласил знаменитый принцип неопределенности, который заключается в том, что чем более точно измеряется, скажем, положение квантовой частицы, тем неопределеннее становится знание ее импульса, и наоборот.

Формализмы, изобретенные этими двумя людьми, разительно отличаются, но итоговые результаты, получаемые для любого физического процесса, всегда совпадают. Впоследствии была доказана полная эквивалентность обоих формализмов. В наше время любой приличный аспирант должен уметь легко переходить от одного формализма к другому, применяя тот или иной, более удобный для решаемой задачи.

Шесть лет спустя, в 1932 г., Поль Дирак предложил в несколько зачаточном виде еще и третий формализм. Идея Дирака оставалась практически забытой вплоть до 1941 г., когда Фейнман разработал и развил этот формализм, который стал известен как формализм

интеграла по траекториям, или суммы предысторий*. (Физики иногда задаются вопросом, полностью ли независимо от Дирака Фейнман разработал свой формализм? Историки науки теперь нашли ответ: нет**. Во время вечеринки в принстонской таверне визитер по имени Герберт Джель (Herbert Jehle) рассказал Фейнману про идею Дирака, и, по-видимому, уже на следующий день Фейнман изложил благоговеющему Джелю разработанный им формализм в реальном времени. См. статью Швебера (S. Schweber) 1986 года в «Reviews of Modern Physics».)

Именно этот формализм и пытается объяснить Фейнман в этой маленькой книжке. Например, на стр. 52, когда Фейнман складывает все эти стрелки, он на самом деле интегрирует (так на жаргоне математического анализа называется сложение) по амплитудам, связанным со всеми возможными траекториями, по которым фотон может попасть из точки S в точку P. Отсюда термин «формализм интеграла по траекториям». Альтернативное название «сумма предысторий» тоже легко понять. Будь законы квантовой физики заметны на макроскопических человеческих масштабах, тогда все альтернативы исторических событий, например, Наполеон, победивший при Ватерлоо, Кеннеди, уклонившийся от пули убийцы, стали бы возможны, и каждой истории соответствовали бы некоторые амплитуды, которые нужно было бы просуммировать («сложить все эти маленькие стрелки»).

Оказалось, что интеграл по траекториям, рассматриваемый как функция конечного состояния, удовлетворяет уравнению Шредингера. Так что интеграл по траекториям есть не что иное как волновая функция. Так образом, формализм интеграла по траекториям полностью эквивалентен формализмам Шредингера и Гейзенберга. На самом деле один из учебников, в котором эта эквивалентность четко описана, был написан Фейнманом и Хибсом***. (Да, Фейнман

---

* В русской физической литературе этот термин практически не используется. — *Примеч. пер.*

** На самом деле эта история в деталях изложена самим Фейнманом в его Нобелевской лекции — см. пер. на русский в [УФН 91, 29 (1967), http://ufn.ru/ru/articles/1967/1/c/]. — *Примеч. пер.*

*** Р. Фейнман, А. Хибс «Квантовая механика и интегралы по траекториям» М., «Мир», 1968. — *Примеч. пер.*

был автором и учебников — этих занудных книг, которые учат вас действовать эффективно, вроде «держать в уме» и «складывать». И да, вы правильно догадались, что учебники Фейнмана часто в основном написаны его соавторами.)

Поскольку формализм интеграла по траекториям Дирака—Фейнмана полностью эквивалентен формализму Гейзенберга, он наверняка содержит в себе и принцип неопределенности. Так что, когда Фейнман с легкостью отменяет принцип неопределенности на стр. 52, в этом есть некоторый перебор. Ну по крайней мере можно поспорить семантически: что он имел в виду, говоря, что принцип неопределенности больше «не нужен»? Все дело в том, полезен он или нет.

Физики-теоретики чрезвычайно прагматичны. Они всегда пользуются самым простым методом. В них нет ничего от приверженности математиков высоким стандартам строгости доказательств. Все, что работает, годится!

Имея все это в виду, вы можете поинтересоваться, какой из трех формализмов — Шредингера, Гейзенберга или Дирака-Фейнмана — самый простой? Ответ зависит от задачи. При описании атомов, например, сам мастер признает: «на диаграммах для таких атомов было бы так много прямых и волнистых линий, что получилась бы полная неразбериха!». Шредингеровский формализм оказывается гораздо более простым, его и используют физики. На самом деле для большинства «практических» проблем пытаться использовать формализм интеграла по траекториям почти невозможно, а в некоторых случаях просто безнадежно. Я однажды спросил Фейнмана о таком очевидно безнадежном примере, и у него не было ответа. А даже начинающие студенты, использующие формализм Шредингера, легко справляются с этими очевидно безнадежными примерами!

Таким образом, какой формализм лучше — зависит от физической задачи, так что физики-теоретики в одной области — атомной физике, например, — могут предпочитать один формализм, тогда как в другой — например, в физике высоких энергий — могут предпочитать другой. Логически рассуждая, может даже случиться так, что по мере развития данной области один формализм как более удобный может сменить другой.

Для конкретности сконцентрируюсь на области, в которой сам работаю, именно, на физике высоких энергий или физике элементарных частиц, которая была также основной областью Фейнмана. Интересно, что долгое время формализм интеграла по траекториям занимал в физике частиц дальнюю третью позицию в этих ска́чках трех формализмов. (Между прочим, ниоткуда не следует, что формализмов может быть только три. Очень возможно, что в один прекрасный момент появится еще один способный молодой человек и предложит четвертый!) На самом деле формализм интеграла по траекториям был настолько непродуктивным для большинства задач, что к концу 1960-х годов он был почти забыт. К этому времени квантовой теории поля почти повсеместно обучали, используя канонический формализм — другое название формализма Гейзенберга, само слово «канонический» должно вам подсказать, какой из формализмов получил наивысшую оценку. Сошлюсь на то, что я сам ни разу не слышал про интеграл по траекториям за все мои студенческие годы, хотя я был студентом и аспирантом в двух достаточно хороших университетах на Восточном побережье. (Я упоминаю Восточное побережье, поскольку, насколько я знаю, интегралу по траекториям интенсивно учили в восточной части Лос-Анджелеса*.) И только когда я уже был постдоком в Институте передовых исследований, я, как и большинство моих коллег, узнал про интеграл по траекториям из одной статьи русских авторов**. Даже в то время некоторые специалисты выражали сомнение в этом формализме.

По иронии судьбы сам Фейнман был ответствен за это плачевное состояние дел. Случилось так, что студенты с легкостью обучались этим «забавным маленьким диаграммам», изобретенным Фейнманом. Джулиан Швингер однажды с горечью сказал, что «Фейнман сделал квантовую теорию поля доступной массам». Он имел в виду то, что теперь любой тупица мог запомнить несколько «пра-

---

* Видимо, подразумевается Caltech — Калифорнийский технологический институт, расположенный на северо-востоке от Лос-Анджелеса, в котором работал сам Фейнман. — *Примеч. пер.*

** По-видимому, имеется в виду статья Faddeev L.D., Popov V.N. Feynman diagrams for the Yang-Mills field. Physics Letters B. 1967. v. 25. pp. 29—30. — *Примеч. пер.*

вил Фейнмана», назвать себя теоретиком-полевиком и сделать неплохую карьеру. Целые поколения изучали диаграммы Фейнмана, не понимая теории поля. Ей-богу, такие профессора еще до сих пор остались!

Но затем, совершенно неправдоподобно — возможно, это часть загадочной силы Фейнмана, которая придала его карьере почти магический ореол, — в начале 1970-х, начиная с упомянутой статьи русских авторов, интегралы по траекториям Дирака—Фейнмана совершили триумфальное возвращение и быстро стали основным способом добиться успеха в квантовой теории поля.

Главное, что делает Фейнмана таким выдающимся физиком — это то, что описанная выше «битва за сердца и умы» происходила между множеством тех, кто использовал диаграммы Фейнмана и их более молодыми противниками, использующими интегралы по траекториям Фейнмана. Спешу добавить, что слово «борьба» является некоторым преувеличением: ничто не мешает физику пользоваться и тем, и другим. Я, со своей стороны, так и делал.

Мне представляется, что мой недавно изданный учебник «В двух словах» — один из немногих, в которых формализм интеграла по траекториям используется с самого начала, в отличие от предыдущих учебников, которые отдавали предпочтение каноническому формализму. Свою вторую главу я начал с раздела, названного «Кошмар профессора: умный студент в классе». В духе апокрифических историй про Фейнмана, я сочинил историю об умном студенте и назвал его Фейнманом. Формализм интеграла по траекториям вводился дзеновской процедурой с бесконечным числом экранов и сверлением бесконечного числа отверстий в каждом, так что в результате ничего от экрана не оставалось. Но как и в аналогии со жрецом майя, после такого вывода в стиле Фейнмана я должен был научить студентов, как на самом деле считать («держать в уме» и «складывать»), и тут я должен был отказаться от апокрифического Фейнмана и привести все детальные дирако-фейнмановские выкладки, включая такие технические подробности, как «добавление множителя 1, равного сумме по полному базису бра- и кет-векторов». Технические подробности — это то, чего вы не узнаете, прочтя книги Фейнмана!

Кстати, если вы об этом задумались, «бра» не имеет ничего общего с Диком Фейнманом — любителем поволочиться. Слово

ввел степенный и немногословный Поль Дирак, имея в виду левую часть угловых скобок <>, <*. Дирак и сам легендарная фигура: мне довелось однажды оказаться с ним в одной компании за ужином, и за всё время он не произнес почти ни слова.

Я не раз хихикал, когда Фейнман вставлял шпильки другим физикам. Вот, например, он говорит о Мюррее Гелл-Манне, блистательном физике и друге-сопернике Фейнмана по Калтеху, как о «большом изобретателе», а через пару страниц, нарушая им же самим тщательно культивируемый образ умника, он сокрушается по поводу общей потери физиками знания греческого, хотя ему отлично известно, что Гелл-Манн не только создал неологизм «глюон», но и вообще превосходный лингвист.

Кроме того, мне понравились самоуничижительные замечания Фейнмана, составляющие неотъемлемую часть его имиджа. Так, например, когда Фейнман говорит о «дураке-физике во время лекции в Калифорнийском университете в 1983 г.», некоторые читатели могут не понять, что Фейнман говорит о себе! И хотя это на самом деле лишь часть его имиджа, мне это симпатично, поскольку теперь среди физиков-теоретиков все больше напыщенности и иерархичности. Фейнману, которого я знал, — подчеркиваю, что я знал его не слишком хорошо — наверняка не понравилась бы эта тенденция. В конце концов, он однажды поднял переполох, собираясь выйти из Национальной академии наук.

Возвращаясь снова к трем типам потенциальных читателей, описанным выше, я хотел бы сказать, что те, кто принадлежит ко второй и третьей группам, получат от этой книги большое удовольствие. Но эта книга втайне предназначалась читателям первого типа. Если вы начинающий и честолюбивый физик-теоретик, я призываю вас проглотить эту книгу со всей жадностью вашего рассудка, а затем обратиться к учебникам по квантовой теории поля, чтобы научиться «держать в уме».

Я уверен, что вы овладеете квантовой теорией поля. Просто помните, что сказал Фейнман: «Что понял один дурак, поймет и другой». Он имел в виду себя — и вас!

Энтони Зи

---

* По-английски «braket». — *Примеч. пер.*

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Книга, которую Вы держите в руках, уникальна. Ее автор — замечательный физик-теоретик, один из главных создателей современной квантовой электродинамики — рассказал об основах этой науки с необыкновенным мастерством.

Хотя лекции, составившие книгу, были адресованы гуманитариям, книгу, без сомнения, с живым интересом и большой пользой для себя прочтут и старшеклассник, и студент-физик, и преподаватель физики, и физик-профессионал.

Узнав о готовящемся русском издании, Ричард Фейнман прислал письмо, содержащее некоторые исправления и уточнения исходного английского текста. Все они учтены при переводе.

Когда книга была еще в производстве, пришло печальное известие о кончине 15 февраля 1988 г. замечательного физика-теоретика нашего столетия, великого физика-педагога Ричарда Фейнмана.

Л. Б. Окунь

ПРЕДИСЛОВИЕ ЛЕОНАРДА МОТНЕРА

Чтение лекций «Памяти Эликс Дж. Мотнер» было организовано в честь моей жены Эликс, скончавшейся в 1982 г. Эликс занималась английской литературой, но неизменно проявляла интерес ко многим областям науки. Поэтому и был создан фонд ее имени в целях ежегодного проведения цикла лекций, которые приобщали бы думающих и заинтересованных людей к идеям и достижениям науки.

Я очень рад, что Ричард Фейнман согласился прочитать первый цикл лекций. Мы дружим уже 55 лет, с самого детства в Фар-Рокуэй, штат Нью-Йорк. Ричард был знаком с Эликс около 22 лет, и ей давно хотелось, чтобы он составил такое объяснение физики элементарных частиц, которое было бы понятно ей и другим неспециалистам.

В дополнение я хотел бы выразить свою благодарность тем, кто принял участие в создании Фонда Эликс Дж. Мотнер и сделал возможным проведение этих лекций.

Лос-Анджелес, Калифорния,
май 1983 г.

ВСТУПЛЕНИЕ РАЛЬФА ЛЕЙТОНА

Ричард Фейнман стал легендарным в мире физики из-за своего особого взгляда на мир: ничего не принимая на веру и обдумывая каждую вещь заново, он часто достигает оригинального и глубокого понимания природы, причем его стиль отличают свежесть и элегантная простота.

Он известен также как энтузиаст преподавания физики. Фейнман, отклонявший бесчисленное множество предложений произнести речь в престижном обществе или организации, может быть «легкой добычей» для студента, который, проходя мимо его кабинета, попросит выступить в физическом клубе местной школы.

Эта книга представляет собой рискованную затею, на которую, насколько нам известно, никто еще не решался. Это честное прямое объяснение непрофессиональной аудитории довольно сложного предмета — квантовой электродинамики. Она задумана таким образом, чтобы дать заинтересованному читателю правильное представление о типе рассуждений, к которым прибегают физики, чтобы объяснить поведение Природы.

Если вы собираетесь изучать физику (или уже изучаете), вы не найдете в этой книге ничего такого, что придется «пе-

реучивать». Это полное описание, точное в каждой детали, некоего каркаса, на который новые, усовершенствованные концепции лягут без изменений. Для тех из вас, кто уже изучал физику, это будет открытием того, что же вы *в действительности* делали, производя сложные вычисления!

В детстве Ричарда Фейнмана вдохновила на занятия математическим анализом книга, которая начиналась так: «То, что может сделать один глупец, может и другой». Он хотел бы обратиться к своим читателям с похожими словами: «То, что может понять один глупец, может и другой».

Пасадина, Калифорния,
февраль 1985 г.

ОТ АВТОРА

Эта книга представляет собой запись лекций по квантовой электродинамике, прочитанных мною в Калифорнийском университете. Лекции записаны и отредактированы моим добрым другом Ральфом Лейтоном. Надо сказать, что рукопись претерпела значительные изменения. Преподавательский и писательский опыт мистера Лейтона оказался очень ценным, когда мы предприняли попытку ознакомить широкую аудиторию с этим центральным разделом физики.

Часто в «популярных» изложениях науки кажущаяся простота достигается за счет описания чего-то совсем другого, за счет существенного искажения того, что берутся описывать. Уважение к нашему предмету не позволило нам этого сделать. Мы провели в обсуждениях много часов, стараясь добиться максимальной ясности и простоты, и бескомпромиссно отвергали искажения истины.

Лекция 1

ВВЕДЕНИЕ

Эликс Мотнер очень интересовалась физикой и часто просила меня что-нибудь ей объяснить. Я все хорошо объяснял (так же, как я объясняю студентам в Калтехе, когда они приходят ко мне по четвергам), но в итоге я так и не смог рассказать самого для меня интересного: мы каждый раз застревали на сумасшедших идеях квантовой механики. Я говорил ей, что не могу объяснить это за час или за вечер — на это потребуется много времени, — но я обещал, что когда-нибудь подготовлю цикл лекций на эту тему.

Я подготовил несколько лекций и отправился проверить их в Новую Зеландию — потому что Новая Зеландия далеко, и если бы лекции не имели успеха, это было бы ничего! В Новой Зеландии решили, что лекции хорошие. Итак, вот лекции, которые я на самом деле подготовил для Эликс, но, к несчастью, теперь я не могу обратиться непосредственно к ней.

Я хотел бы рассказать про *известное* в физике, а не про неизвестное. Обычно люди интересуются новейшими достижениями, которые позволяют перейти от одной теории к другой, так что не удается рассказать хоть что-нибудь про теорию, с которой мы как следует разобрались. Они всегда хотят знать то, чего мы сами не знаем. Поэтому вместо того, чтобы запутать вас множеством полуготовых малоизученных

теорий, я хотел бы рассказать о предмете, исследованном весьма досконально. Я люблю эту область физики и считаю ее замечательной. Она называется квантовой электродинамикой или, сокращенно, КЭД.

Основная задача моих лекций — как можно точнее описать странную теорию взаимодействия света и вещества или, точнее, взаимодействия света и электронов. Чтобы объяснить все, что я хочу, потребуется много времени. Но у нас впереди четыре лекции, так что я не буду торопиться, и мы во всем разберемся.

История физики состоит в синтезировании на основе множества явлений нескольких теорий. Например, с давних пор были известны тепловые, световые, звуковые явления, движение и гравитация. Однако после того как сэр Исаак Ньютон объяснил законы движения, оказалось, что некоторые из этих на первый взгляд не связанных вещей — разные стороны одного и того же явления. Например, звуковые явления — это не что иное, как движение атомов воздуха. Так что звук перестали считать чем-то отдельным от движения. Обнаружилось также, что и тепловые явления легко объясняются законами движения. Таким образом, огромные разделы физики сливались в более простую теорию. С другой стороны, гравитацию не удавалось объяснить законами движения, и даже сегодня она стоит обособленно от всех прочих теорий. Гравитацию пока нельзя объяснить никакими другими явлениями.

За синтезом явлений движения, тепла и звука последовало открытие целого ряда явлений, которые мы называем электрическими и магнитными. В 1873 г. Джеймс Кларк Максвелл объединил их со световыми и оптическими явлениями и создал единую теорию, в которой свет рассматривается как электромагнитная волна. Итак, на этой стадии существовали законы движения, законы электромагнетизма и законы гравитации.

Примерно в 1900 г. была создана теория, объясняющая, что такое вещество. Она получила название электронной теории вещества и гласила, что внутри атомов находятся маленькие заряженные частицы. Развитие этой теории привело к пониманию того, что электроны движутся вокруг тяжелых ядер.

Все попытки объяснить вращение электронов вокруг ядра законами механики — теми же, при помощи которых Ньютон вычислял движение Земли вокруг Солнца,— оказались неудачными. Ни одно предсказание не подтвердилось. (Между прочим, теория относительности, которую вы все считаете великой революцией в физике, разрабатывалась приблизительно в это же время. Но по сравнению с этим открытием — что законы движения Ньютона не годятся для атомов — теория относительности была всего лишь незначительным усовершенствованием.) Выработка новой системы взглядов, способной заменить законы Ньютона, заняла долгое время, так как все, что происходило на атомном уровне, казалось очень странным. Надо было расстаться со здравым смыслом, чтобы представить себе, что же происходит на атомном уровне. Наконец, в 1926 г. была разработана «бредовая» теория, объяснявшая «новый тип поведения» электронов в веществе. Она только казалась сумасшедшей. Ее назвали квантовой механикой. Слово «квантовая» относится к той странной особенности природы, которая противоречит здравому смыслу. Про эту особенность я и собираюсь вам рассказать.

Квантовая механика объяснила, кроме того, всевозможные частные проблемы, например, почему при соединении атома кислорода с двумя атомами водорода получается вода и т. д. Таким образом, квантовая механика легла в основу теории химии. Так что фундаментальная теоретическая химия — это на самом деле физика.

Квантовая механика была замечательным достижением, так как смогла объяснить всю химию и различные свойства

веществ. Но по-прежнему оставалась нерешенной проблема взаимодействия света и вещества. То есть требовалось изменить теорию электричества и магнетизма Максвелла, чтобы привести ее в соответствие со вновь разработанными принципами квантовой механики. И вот, наконец, в 1929 г. рядом физиков была создана новая теория — квантовая теория взаимодействия света и вещества, получившая ужасное название «квантовая электродинамика».

К несчастью, у этой теории был серьезный недостаток. Если вы считали что-то приближенно, ответ получался разумным. Но если вы пытались посчитать более точно, оказывалось, что поправка, которая, казалось бы, должна быть незначительной (например, следующий член ряда), была в действительности большой и даже очень большой. В действительности она равнялась *бесконечности*. Так что получалось, что *ничего* нельзя посчитать с высокой точностью.

Кстати, все, что я вам сейчас рассказал, представляет собой пример того, что я называю «история физики глазами физика»,— а она всегда неправильна. Я передаю вам весьма условный миф, который физики рассказывают своим студентам, а эти студенты — своим студентам, и все это совсем не обязательно имеет отношение к реальному историческому развитию, которого я в действительности не знаю!

Но продолжим нашу «историю». Используя теорию относительности, Поль Дирак разработал релятивистскую теорию электрона, которая не учитывала всех эффектов взаимодействия электрона со светом. Согласно теории Дирака электрон обладает магнитным моментом — как маленький магнитик — равным точно 1 в определенных единицах измерения. Затем примерно в 1948 г. экспериментаторы открыли, что действительная величина ближе к 1,00118 (с погрешностью около 3 в последней цифре). Поскольку, конечно, было известно, что электроны взаимодействуют со светом, ожидали небольшой поправки. Ожидали также, что эту поправ-

ку можно будет объяснить с точки зрения новой теории квантовой электродинамики. Но когда произвели вычисления, то вместо 1,00118 получили бесконечность — что, разумеется, противоречит опыту!

Проблема вычислений в квантовой электродинамике была решена Джулианом Швингером, Синьитиро Томонагой и мною примерно в 1948 г. Швингер первым посчитал поправку, используя некую хитрость. Его теоретическая оценка была равна приблизительно 1,00116. Она оказалась достаточно близка к экспериментальным данным и подтвердила правильность избранного нами пути. Наконец у нас появилась квантовая теория электричества и магнетизма, при помощи которой мы могли считать! Эту теорию я собираюсь вам описать.

Квантовая электродинамика существует уже свыше пятидесяти лет. Она многократно подвергалась все более и более тщательной проверке во все более разнообразных условиях. В настоящее время я могу с гордостью сказать, что между экспериментом и теорией *нет существенных расхождений!*

Эту теорию, можно сказать, прокрутили в центрифуге, и она выдержала испытание на прочность. Приведу несколько последних данных. Эксперименты дают для числа Дирака 1,00115965221 (с погрешностью около 4 в последнем знаке), а теория — 1,00115965246 (с примерно в пять раз большей погрешностью). Чтобы вы смогли оценить точность этих чисел, представьте себе, что вы измерили расстояние от Лос-Анджелеса до Нью-Йорка с точностью до толщины человеческого волоса. Вот с какой точностью была проверена квантовая электродинамика за последние пятьдесят лет — как теоретически, так и экспериментально. Между прочим, я привел вам только один пример. И многие другие величины, измеренные со сравнимой точностью, также очень хорошо согласуются с теорией. Теория проверялась в диапазоне расстояний от ста размеров земного шара до одной сотой атом-

ного ядра. Я привожу эти числа, чтобы заставить вас поверить, что теория не так уж плоха! Впоследствии я расскажу, как делались эти вычисления.

Я хотел бы еще раз поразить вас огромным диапазоном описываемых квантовой электродинамикой явлений. Проще сказать иначе: теория описывает *все* явления физического мира за исключением гравитации — того, что удерживает вас на ваших местах (на самом деле, я думаю, это сочетание гравитации и вежливости) — и радиоактивных явлений, которые состоят в переходах ядер с уровня на уровень. Итак, что у нас остается помимо гравитации и радиоактивности (более точно, ядерной физики)? Бензин, сгорающий в автомобильных двигателях, пена и пузыри, твердость соли или меди, упругость стали. Да и биологи пытаются при помощи химии понять как можно больше свойств живого, а, как я уже объяснял, теория, стоящая за химией,— это квантовая электродинамика.

Я должен внести некоторую ясность. Хоть я и говорю, что все явления физического мира можно объяснить этой теорией, но в действительности мы этого не знаем. Большинство известных нам явлений происходит с участием такого *гигантского* количества электронов, что проследить за ними не под силу нашему бедному рассудку. В подобных случаях мы можем использовать теорию, чтобы хоть приблизительно вычислить, что должно происходить. Примерно это и происходит на самом деле.

Но если мы поставим в лаборатории эксперимент всего с *несколькими* электронами в *простых* условиях, мы сможем с очень большой точностью рассчитать, что должно происходить, и провести очень точные измерения. В таких условиях квантовая электродинамика работает прекрасно.

Мы, физики, всегда стараемся проверить, все ли в порядке с теорией. Такова игра, потому что, если что-нибудь *не так,* становится интересно! Но до сих пор мы не нашли ничего неправильного в квантовой электродинамике. Поэтому

я бы сказал, что это жемчужина физики и предмет нашей величайшей гордости.

Квантовая электродинамика является также прототипом новых теорий, которые пытаются объяснить ядерные явления — то, что происходит внутри атомных ядер. Если представить физический мир как театр, актерами в нем будут не только электроны, находящиеся вне ядер атомов, но и кварки, глюоны, и т. д.— десятки типов частиц внутри ядра. И хотя все эти «актеры» совершенно не похожи друг на друга, все они играют в определенном стиле — странном и необычном — в «квантовом стиле». В конце я расскажу вам немного про ядерные частицы. А сейчас, чтобы было проще, я буду рассказывать только про фотоны (частицы света) и электроны. Потому что тут важно, *как именно* они играют свои роли, а играют они их очень интересно.

Теперь, когда вы знаете, о чем я собираюсь рассказывать, возникает вопрос, сможете ли вы *понять* то, что я намерен рассказать. Каждый, кто приходит на научную лекцию, уверен, что ничего там не поймет, но если у лектора красивый галстук, то будет на что посмотреть. Но не в этом случае! (Фейнман не носит галстуков.)

То, о чем я собираюсь вам рассказывать, студенты-физики изучают на третьем или четвертом курсе — и вы думаете, что я собираюсь это объяснить так, чтобы вы все поняли? Нет, вы не сможете этого понять. Зачем же я буду докучать вам всем этим? Зачем вам сидеть и слушать все это, если вы все равно ничего не поймете? Моя задача — убедить вас *не* отворачиваться из-за того, что вы этого не понимаете. Дело в том, что мои студенты-физики тоже этого не понимают. Потому что *я сам* этого не понимаю. Никто не понимает.

Мне хотелось бы сказать несколько слов о понимании. Существует много причин, по которым вы можете не понимать, о чем говорит лектор. Одна из них — плохой язык. Лектор не может выразить то, что хочет, или начинает не с

того конца — и его трудно понять. Это довольно простой случай, и я буду изо всех сил бороться со своим нью-йоркским акцентом.

Другая причина, особенно если лектор — физик, состоит в том, что он употребляет обычные слова в необычном значении. Физики часто используют обычные слова, например, «работа», или «действие», или «энергия», или, даже, как вы увидите, «свет» — в необычном, специальном смысле. Так, говоря о «работе» в физике, я имею в виду одно, говоря о «работе» на улице — совсем другое. Во время лекции я могу употребить одно из таких слов, не замечая, что употребляю его необычным образом. Я буду стараться следить за собой — это моя обязанность, но такую ошибку легко совершить.

Следующая причина, по которой вы можете решить, что не понимаете, о чем я говорю, состоит в том, что, когда я буду описывать, *как* устроена Природа, вы не поймете, *почему* она так устроена. Но знаете, ведь этого никто не понимает. Я не могу объяснить, почему Природа ведет себя именно так, а не иначе.

Наконец, возможно и такое: я сообщаю вам нечто, а вы не можете в это поверить. Вы этого не принимаете. Вам это не нравится. Опускается завеса, и вы больше ничего не слушаете. Я буду рассказывать, как устроена Природа, если вам не понравится, как она устроена, это будет мешать вашему пониманию. Физики научились решать эту проблему: они поняли, что нравится им теория или нет — *не важно*. Важно другое — дает ли теория предсказания, которые согласуются с экспериментом. Тут не имеет значения, хороша ли теория с философской точки зрения, легка ли для понимания, безупречна ли с точки зрения здравого смысла. Квантовая электродинамика дает совершенно абсурдное с точки зрения здравого смысла описание Природы. И оно полностью соответствует эксперименту. Так что я надеюсь, что вы сможете принять Природу такой, как Она есть — абсурдной.

Я с удовольствием предвкушаю рассказ об этой абсурдности, потому что она, по-моему, восхитительна. Пожалуйста, не отворачивайтесь из-за того, что вы не можете поверить, что Природа устроена так странно. Выслушайте меня до конца, и я надеюсь, что, когда мы закончим, вы разделите мое восхищение.

Как я буду объяснять вам вещи, о которых не рассказываю своим студентам до третьего курса? Позвольте провести такую аналогию. Индейцев майя интересовали восходы и заходы Венеры. Им было очень интересно знать, когда она появляется как утренняя звезда, а когда — как вечерняя. После многолетних наблюдений они заметили, что пять циклов Венеры почти в точности равны восьми 365-дневным календарным годам (они знали, что астрономический год отличается от календарного и учитывали это в своих расчетах). Чтобы производить вычисления, майя изобрели систему черточек и точек, изображающих числа (включая нуль) и вывели правила, по которым рассчитывали и предсказывали не только восходы и заходы Венеры, но и другие небесные явления, например лунные затмения.

В те времена лишь немногие жрецы майя умели производить столь сложные вычисления. Теперь представим себе, что мы бы спросили одного из них, как сделать всего одно действие из сложного процесса предсказания следующего утреннего появления Венеры — как вычесть одно число из другого. И предположим, что в отличие от нынешнего времени мы не ходили в школу и не умеем вычитать. Каким образом жрец объяснил бы нам, что такое вычитание?

Он мог бы или научить нас числам, изображаемым черточками и точками, и правилам «вычитания», или рассказать нам, что он на самом деле делал: «Предположим, мы хотим вычесть 236 из 584. Прежде всего отсчитаем 584 боба и положим их в горшок. Затем вынем 236 бобов и отложим в сторону. Наконец, сосчитаем бобы, оставшиеся в горшке. Это число и будет результатом вычитания 236 из 584».

Вы можете сказать: «О, Кецалькоатль!* Какая *тоска* — считать бобы, класть в горшок, вынимать из горшка — ну и занятие!»

На что жрец ответил бы: «Именно поэтому у нас есть правила для черточек и точек. Правила сложные, но при помощи этих правил гораздо легче получить ответ, чем пересчитывая бобы. Но что касается *ответа,* то совершенно не важно, каким способом он получен: мы можем предсказать появление Венеры, считая бобы (этот способ медленный, но простой и понятный) или применяя сложные правила (это намного быстрее, но требует многих лет учебы в школе).

Понять, *как* устроено вычитание — если только вам самим не надо заниматься вычислениями — не так трудно. Из этого я исхожу. Я собираюсь объяснить вам, что именно физики *делают,* когда предсказывают поведение Природы, но я не стану учить вас приемам, необходимым тому, кто хочет сам *эффективно* этим заниматься. Вы обнаружите, что для получения каких-то разумных предсказаний при помощи квантовой электродинамики придется рисовать на листе бумаги огромное количество маленьких стрелочек. Наши студенты-физики семь лет (четыре года в университете и три года в аспирантуре) учатся делать это умело и профессионально. Таким образом мы перемахнем через целых семь лет физического образования. Я надеюсь, что, познакомившись с тем, что мы *реально делаем,* занимаясь квантовой электродинамикой, вы поймете ее лучше, чем некоторые студенты!

Продолжая нашу аналогию с майя, мы могли бы спросить жреца, *почему* пять циклов Венеры длятся приблизительно 2920 дней или восемь лет. Можно предложить множество теорий, отвечающих на это *почему.* Например: «20 — важное число в

---

* В мифологии индейцев Центральной Америки Кецалькоатль — одно из трех главных божеств, творец мира, создатель человека и культуры, бог утренней звезды, покровитель жречества и науки. — *Примеч. пер.*

нашей системе счисления, а если разделить 2920 на 20, получится 146, т. е. на единицу больше, чем число, которое можно представить в виде суммы двух квадратов двумя различными способами» и так далее. Но такая теория, конечно, не будет иметь ни малейшего отношения к Венере. В настоящее время мы пришли к выводу о ненужности такого рода теорий. Итак, мы оставим в стороне вопрос о том, *почему* Природа устроена так, а не иначе; для объяснения этого хороших теорий нет.

До сих пор я пытался правильно настроить вас. Иначе ничего не получится. Теперь мы готовы. Вперед!

Начнем со света. Когда Ньютон начал изучать свет, он прежде всего обнаружил, что белый свет представляет собой смесь цветов. С помощью призмы он разложил белый свет на различные цвета, но когда он пропускал через другую призму свет одного цвета, например красный, оказалось, что его нельзя разложить дальше. Таким образом, Ньютон узнал, что белый свет представляет собой смесь разных цветов, каждый из которых является чистым, в том смысле, что его нельзя разложить дальше.

(На самом деле свет каждого цвета может быть расщеплен еще раз, по-другому, в соответствии с его так называемой «поляризацией». Эта особенность света не существенна для понимания характера квантовой электродинамики. Поэтому, ради простоты, я не буду ее рассматривать, вследствие чего мое описание теории не будет абсолютно полным. Это небольшое упрощение никоим образом не повредит настоящему пониманию того, о чем я буду рассказывать. И все же я обязательно должен упоминать все, что будет пропущено.)

Когда я говорю «свет» в этих лекциях, я имею в виду не просто свет, который мы можем видеть, от красного до синего. Оказывается, что видимый свет — это только часть длинной шкалы, аналогичной музыкальному звукоряду, в котором есть ноты и выше, и ниже, чем можно услышать. Световую шкалу можно описать при помощи чисел, которые

называются частотами. По мере возрастания чисел свет меняется от красного к синему, фиолетовому и ультрафиолетовому. Мы не видим ультрафиолетового света, но он действует на фотопластинки. Это тоже свет — только число другое. (Не следует быть ограниченными: то, что мы можем непосредственно обнаружить своими органами чувств, глазами, это далеко не все, что есть на свете!) Если мы просто будем дальше менять это число, то попадем в рентгеновское излучение, гамма-излучение и так далее. Если же мы будем изменять число в другом направлении, то придем от синего к красному свету, инфракрасным (тепловым) волнам, затем к телевизионным волнам и к радиоволнам. Для меня все это — «свет». Я собираюсь использовать в большинстве моих примеров просто красный свет. Но квантовая электродинамика охватывает весь описанный мною диапазон и стоит за всеми этими различными явлениями.

Ньютон считал, что свет состоит из частиц — он называл их «корпускулы» — и он был прав (но рассуждения, которые приводили его к этому выводу, были ошибочными). Мы знаем, что свет состоит из частиц, потому что мы можем взять очень чувствительный прибор, щелкающий, когда на него падает свет, и если свет станет тускнеть, щелчки станут более редкими, но сохранят свою громкость. Таким образом, свет — это что-то наподобие дождевых капель. Каждая «капля» света называется фотоном, и если весь свет одного цвета, то все «капли» будут одного размера.

Человеческий глаз — это очень хороший прибор: требуется только пять-шесть фотонов, чтобы активировать нервную клетку и послать сигнал в мозг. Если бы мы продвинулись несколько дальше в своем развитии, и наше зрение было бы в десять раз чувствительнее, это обсуждение было бы не нужно. Все мы видели бы, что тусклый свет — это серия разделенных промежутками слабых вспышек равной интенсивности.

Вам может показаться удивительным: как это можно обнаружить отдельный фотон. Один из используемых для этого приборов называется фотоумножителем. Я коротко опишу, как он работает. Когда фотон ударяется о металлическую пластинку *A* (см. рис. 1), он выбивает электрон из одного из атомов пластинки. Свободный электрон притягивается к пластинке *B* (которая заряжена положительно) и, ударившись о нее с достаточной силой, высвобождает три

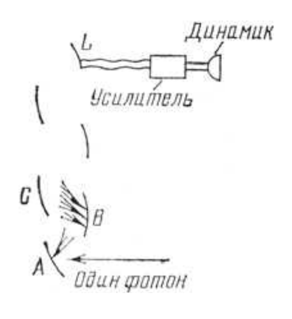


Рис. 1. Фотоумножитель может обнаружить единичный фотон. Когда фотон ударяется о пластинку *A,* он выбивает оттуда электрон, который притягивается к положительно заряженной пластинке *B* и высвобождает еще больше электронов. Этот процесс продолжается до тех пор, пока миллиарды электронов не попадут на последнюю пластинку *L* и не образуют электрический ток, который усиливается обычным усилителем. Если к усилителю подключен динамик, то каждый раз, когда фотон данного цвета попадает на пластинку *A,* раздаются щелчки одинаковой громкости

или четыре электрона. Каждый из электронов, выбитых из пластинки *B,* притягивается к пластинке *C* (которая также заряжена положительно) и, столкнувшись с пластинкой *C*, высвобождает еще больше электронов. Этот процесс повторяется десять или двенадцать раз, пока миллиарды электронов, способные создать ощутимый электрический ток, не ударятся в последнюю пластинку *L*. Этот ток можно усилить обычным усилителем и пропустить через динамик, чтобы были слышны щелчки. Каждый раз, когда фотон данного цвета попадает в фотоумножитель, раздается щелчок одной и той же громкости.

Если вы расставите вокруг много фотоумножителей и будете светить очень тусклым светом в разных направлениях, свет попадет в один из фотоумножителей и произведет щелчок полной громкости. Все или ничего: если один фотоумножитель срабатывает в данный момент, никакой другой уже не срабатывает (кроме того редкого случая, когда два фотона одновременно вылетают из источника света). Свет не распадается на «половинки частиц», которые летят в разные места.

Хочу особенно подчеркнуть, что свет существует именно в виде частиц — это очень важно знать. Это особенно важно знать тем из вас, кто ходил в школу, где, возможно, что-то говорили о волновой природе света. Я говорю вам, как он *на самом деле* ведет себя — как частицы.

Вы можете сказать, что это только фотоумножитель показывает, что свет состоит из частиц. Но нет, любой прибор, достаточно чувствительный, чтобы реагировать на слабый свет, всегда в конце концов обнаруживал то же самое: свет состоит из частиц.

Я буду исходить из того, что вы представляете себе свойства света в повседневных обстоятельствах — например, что свет распространяется прямолинейно, что преломляется, попадая в воду, что, когда свет отражается от зеркальной поверхности, угол падения равен углу отражения, что свет можно разложить на цвета, что очень красивые цвета видны на луже, когда в нее попадет немного масла, что линза фокусирует свет и т. д. Я буду использовать эти знакомые вам явления, чтобы проиллюстрировать действительно странное поведение света и постараюсь объяснить эти явления при помощи квантовой электродинамики. Я рассказал вам о фотоумножителе, чтобы проиллюстрировать основополагающий факт, который мог быть вам неизвестен,— что свет состоит из частиц, но теперь, надеюсь, вы знаете и это!

Полагаю, всем вам известно, что свет частично отражается от некоторых поверхностей, например от воды. Сколь-

ко романтических полотен посвящено отражению в озере лунного света (и сколько раз вы попадали в беду *из-за* лунного света, отражавшегося в озере!). Глядя на воду, вы можете увидеть (особенно днем) то, что находится в глубине, но видите также и отражение от поверхности. Другой пример — стекло. Если днем в комнате горит лампа, и вы смотрите в окно, то вам видно и то, что происходит снаружи, и тусклое отражение лампы в комнате. Таким образом, свет частично отражается от поверхности стекла.

Прежде чем продолжить, хочу обратить ваше внимание на некое упрощение, которое я сделаю вначале и которое будет исправлено позже: говоря о частичном отражении света от стекла, я буду предполагать, что свет отражается только от *поверхности* стекла. В действительности кусок стекла — это страшно сложное чудовище, в котором кишит огромное количество электронов. Когда фотон попадает в стекло, он взаимодействует с электронами *во всем* стекле, а не только с теми, что на поверхности. Фотон и электроны исполняют некий танец, конечный результат которого точно такой же, как если бы фотон ударялся только о поверхность. Так что позвольте мне пока сделать такое упрощение. А позже я покажу вам, что на самом деле происходит в стекле, и вы поймете, почему окончательный результат тот же.

Теперь я хотел бы описать вам один эксперимент и сообщить его удивительные результаты. В этом эксперименте несколько фотонов одного цвета, допустим, красного, попадают из источника на кусок стекла (см. рис. 2). Фотоумножитель установлен в точке *A* над стеклом и ловит все фотоны, отраженные передней поверхностью. Чтобы определить, сколько фотонов проходит через переднюю поверхность, другой фотоумножитель установлен в точке *B* внутри стекла. Не обращайте внимания на очевидные трудности, связанные с установкой фотоумножителя внутри стекла. Каковы же результаты этого эксперимента?

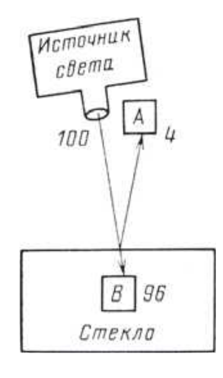


Рис. 2. Эксперимент для измерения частичного отражения света от одной поверхности стекла. Из каждых 100 фотонов, покидающих источник света, 4 отражаются от передней поверхности и попадают в фотоумножитель *A,* в то время как остальные 96 проходят сквозь переднюю поверхность и оказываются в фотоумножителе *B*

Из каждых 100 фотонов, летящих вниз под прямым углом к стеклу, в среднем 4 попадают в точку *A* и 96 — в *B*. Итак, в этом случае частичное отражение означает, что 4 % фотонов отражаются передней поверхностью стекла, в то время как остальные 96 % пропускаются. Мы *уже* столкнулись с большой трудностью: как это свет может *частично* отражаться? Каждый фотон заканчивает свой путь в *A* или в *B* — как фотон решает, куда ему лететь, в *A* или в *B*? (Смех в аудитории.) Это может звучать как шутка, но мы не можем просто смеяться. Нам придется объяснить это при помощи теории! Частичное отражение — это уже непостижимая загадка, и это была очень трудная задача для Ньютона.

Можно придумать несколько возможных теорий, объясняющих частичное отражение света от стекла. Одна из них состоит в том, что 96 % поверхности стекла — это «дырки», которые пропускают свет, в то время как остальные 4 % заняты маленькими «пятнышками» отражающего материала (см. рис. 3). Ньютон понимал, что это объяснение не годится*. Через минуту мы столкнемся с такой странной особен-

---

* Откуда он знал? Ньютон был великим человеком, он писал: «Потому что я могу отполировать стекло». Вас может удивить, с чего он взял, что если можно отполировать стекло, то не должно быть дырок и пятен? Ньютон сам шлифовал свои линзы и зеркала и знал, что он делает при шлифовке — царапает поверхность стекла порош-

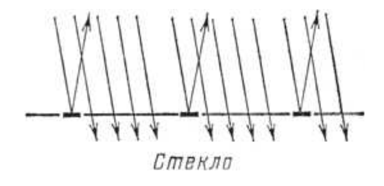


Рис. 3. Одна из теорий, объясняющих частичное отражение от одной поверхности, предполагает, что поверхность состоит в основном из «дырок», которые пропускают свет, и немногих «пятен», которые отражают свет

ностью частичного отражения, что она собьет с толку любого сторонника теории «дырок и пятен» — или другой какой-нибудь разумной теории!

Другая возможная теория состоит в том, что фотоны имеют какой-то внутренний механизм — «колесики» и «шестеренки», которые поворачиваются некоторым образом,— так что когда фотон «нацелен» правильно, он проходит сквозь стекло, а когда неправильно — отражается. Мы можем проверить эту теорию, постаравшись отфильтровать фотоны, нацеленные правильно, при помощи нескольких дополнительных стеклянных пластинок между источником и первым стеклом. После прохождения через фильтры *все* фотоны, достигшие стекла, должны быть нацелены правильно, и ни один из них не должен отразиться. Эта теория плоха тем, что не согласуется с экспериментом: даже пройдя сквозь много слоев стекла, 4 % фотонов, достигших данной поверхности, отражаются от нее.

ками все более тонкого помола. По мере того как царапины становятся все тоньше и тоньше, поверхность стекла меняет свой облик и из матово-серой (так как свет рассеивается большими царапинами) становится прозрачно-ясной (потому что очень тонкие царапины пропускают свет насквозь). Таким образом, он увидел, что невозможно предположить, будто очень мелкие неровности, вроде царапинок или пятен и дырок, могут влиять на свет. В действительности он обнаружил, что верно обратное. Тончайшие царапинки и, следовательно, такие же маленькие пятнышки не оказывают влияния на свет. Так что теория дырок и пятен не годится.

Сколько бы мы ни старались изобрести разумную теорию, объясняющую, как фотон «решает», проходить ли ему сквозь стекло или отскакивать назад, предсказать, как будет двигаться данный фотон, невозможно. Философы утверждали, что если одинаковые условия не приводят всегда к одинаковым результатам, предсказания невозможны и наука потерпит крах. Вот условие, которое приводит к различным результатам: одинаковые фотоны летят в одном направлении к одному куску стекла. Мы не можем предсказать, попадет ли данный фотон в *A* или *B*. Все, что мы можем предсказать — это то, что из 100 вылетевших фотонов в среднем 4 отразятся от поверхности. Значит ли это, что физику, науку великой точности, свели к тому, чтобы вычислять *вероятность* события и не предсказывать точно, что произойдет? Да. Так оно и есть. Это отступление. Природа позволяет нам вычислять только вероятности. Но наука не потерпела краха.

Если частичное отражение от одной поверхности — это непостижимая загадка и трудная проблема, то частичное отражение от двух или более поверхностей совершенно ошеломляет. Позвольте показать почему. Поставим второй эксперимент, в котором мы будем измерять частичное отражение света от двух поверхностей. Заменим кусок стекла очень тонкой стеклянной пластинкой со строго параллельными поверхностями и поместим фотоумножители под пластинкой на пути света от источника (см. рис. 4). На этот раз фотоны могут отразиться от передней или задней поверхности и попасть в *A;* все остальные попадут в *B*. Мы могли бы ожидать, что передняя поверхность отразит 4 % света, а задняя — 4 % из оставшихся 96 %, т.е. в целом отразится примерно 8 %. Так что мы должны обнаружить, что из каждых 100 фотонов, испускаемых источником, примерно 8 попадут в *A*.

В действительности в этих тщательно контролируемых лабораторных условиях очень редко 8 из 100 фотонов попадают в *A*. С некоторыми пластинками мы постоянно полу-

чаем 15 или 16 фотонов — вдвое больше ожидаемого результата! Другие пластинки всегда дают 1 или 2 фотона, третьи — 10, а от некоторых свет вообще не отражается! Чем объясняются эти ненормальные результаты? Проверив качество и однородность пластинок, мы обнаруживаем, что они лишь слегка различаются толщиной.

Чтобы проверить гипотезу, что количество света, отраженного двумя поверхностями, зависит от толщины стекла, проведем серию экспериментов. Начнем с тончайшей плас-

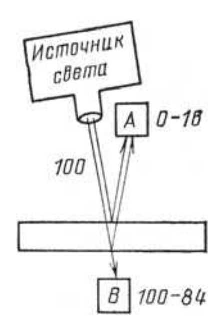


Рис. 4. Эксперимент для измерения частичного отражения света от двух поверхностей стекла. Фотоны могут попасть в фотоумножитель *A,* отразившись либо от передней, либо от задней поверхности стеклянной пластинки; кроме того, они могут пройти сквозь обе поверхности и попасть в фотоумножитель *B.* В зависимости от толщины стекла от 0 до 16 фотонов из каждых 100 попадают в фотоумножитель *A.* Эти результаты представляют трудность для любой разумной теории, включая теорию «дырок и пятен» (см. рис. 3). Оказывается, частичное отражение может быть «погашено» или «усилено» наличием добавочной поверхности

тинки и измерим, сколько фотонов из каждых 100, испущенных источником, достигнут фотоумножителя в *A.* Затем заменим пластинку чуть более толстой и произведем новые измерения. Повторим эти действия несколько десятков раз. Что мы получим?

В случае самой тонкой пластинки мы получим, что число фотонов, приходящих в *A,* почти всегда равно нулю, а иногда равно 1. Заменив тончайшую пластинку чуть более толстой, получаем, что количество отраженного света стало больше — ближе к ожидаемым 8 %. Еще несколько замен — и количество фотонов, попадающих в *A,* начинает превышать

8 %. По мере постепенного утолщения пластинок количество света, отраженного двумя поверхностями, достигает максимума, 16 % (это происходит при толщине в 5 миллионных дюйма), а затем снова понижается до 8 % и далее до нуля. При какой-то определенной толщине пластинки отражения вообще нет. (Попробуйте-ка получить *это* с пятнами!)

Если дальше продолжать утолщать стекло, частичное отражение будет увеличиваться до 16 % и возвращаться к нулю — этот цикл повторяется снова и снова (рис. 5). Ньютон обнаружил эти колебания и поставил один эксперимент, который мог быть правильно проинтерпретирован, только

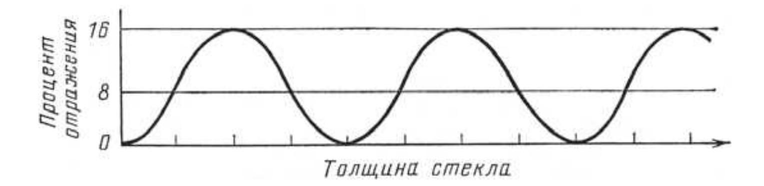


Рис. 5. Результаты эксперимента по тщательному измерению зависимости степени частичного отражения света от толщины стекла демонстрируют явление, называемое «интерференцией». По мере увеличения толщины стекла степень частичного отражения света проходит повторяющийся цикл от 0 до 16 % без признаков затухания

если число таких колебаний достигало по меньшей мере 34 000 циклов! Сегодня, имея лазеры (которые дают очень чистый монохроматический свет), мы можем отчетливо наблюдать колебания после более чем 100 000 000 повторений. Это соответствует более чем 50-метровой толщине стекла. (В обычной жизни мы не наблюдаем этого явления, потому что источник, как правило, не является монохроматическим.)

Таким образом, получается, что предсказанные нами 8 % верны лишь в среднем (тогда как в действительности величина регулярно меняется от нуля до 16 %). Это среднее значение верно только дважды в цикле — так стоящие часы по-

казывают правильное время два раза в сутки. Чем можно объяснить эту странную зависимость частичного отражения от толщины стекла? Как может передняя поверхность отражать 4 % света (что доказывается нашим первым экспериментом), если, поместив снизу на нужном расстоянии вторую поверхность, мы можем каким-то образом «выключить» отражение? А поместив эту вторую поверхность на несколько иной глубине, мы можем «усилить» отражение до 16 %! Может ли быть, что задняя поверхность оказывает какое-то влияние или действие на способность передней поверхности отражать свет? А что если мы добавим *третью* поверхность?

При наличии третьей или любого другого числа следующих поверхностей количество отражаемого света опять меняется. Получается, что мы с нашей теорией перебираем поверхности одну за другой, не зная, достигли ли мы, наконец, последней. Нужно ли фотону делать то же самое, чтобы «решить», отражаться ли ему от передней поверхности?

У Ньютона было несколько остроумных соображений относительно этой проблемы*, но в итоге он понял, что еще не создал удовлетворительной теории.

---

* Нам очень повезло, что Ньютон убедил себя в том, что свет состоит из «корпускул»: мы можем увидеть, какой сложный путь должен пройти живой и пытливый ум, пытаясь объяснить явление частичного отражения от двух или большего числа поверхностей. (Тем, кто считал, что свет — это волны, не надо было ломать над этим голову.) Ньютон рассуждал следующим образом. Хотя кажется, что свет отражается от передней поверхности, он не может отражаться от этой поверхности. Если бы он отражался, то каким образом уже отраженный от передней поверхности свет мог бы опять оказаться задержанным, если толщина такова, что отражения не должно быть вообще? Тогда свет должен отражаться от второй поверхности. Но чтобы объяснить тот факт, что толщина стекла определяет степень частичного отражения, Ньютон предложил следующую идею: свет, ударившись о первую поверхность, создает

На протяжении многих лет после Ньютона частичное отражение от двух поверхностей благополучно объяснялось волновой теорией*, но когда провели эксперименты, в ко-

---

нечто вроде волны или поля, которое движется вместе со светом и предрасполагает его к тому, чтобы отразиться или не отразиться от второй поверхности. Он называл этот процесс «приступами легкого отражения или легкого прохождения», циклически повторяющимися в зависимости от толщины стекла.

В связи с этой идеей возникают две трудности. Первая— это эффект добавочных поверхностей. Каждая новая поверхность влияет на отражение — это я описал в тексте. Другая проблема состоит в том, что свет, безусловно, отражается от озера, у которого нет второй поверхности. Так что свет *должен* отражаться от передней поверхности. В случае единичных поверхностей Ньютон говорил, что свет имеет предрасположение к тому, чтобы отразиться. Можем ли мы иметь теорию, согласно которой свет знает, в какую поверхность он попадает и единственная ли она?

Ньютон не подчеркивал специально этих противоречий в своей теории «приступов легкого отражения и прохождения», хотя ясно, что он сознавал ее неудовлетворительность. Во времена Ньютона не обращали особого внимания на недостатки теории, их замазывали — стиль отличался от того, к которому мы привыкли в науке сегодня, когда мы указываем на все те места, где наша теория не согласуется с данными эксперимента. Я не пытаюсь обвинить Ньютона. Я просто хочу высказаться в пользу того, как мы обмениваемся информацией в науке сегодня.

* Эта идея основывалась на способности волн взаимно усиливаться или взаимно гаситься, и расчеты в рамках этой модели соответствовали результатам как экспериментов Ньютона, так и экспериментов, проводившихся на протяжении столетий после Ньютона. Но когда были разработаны приборы, достаточно чувствительные, чтобы реагировать на единичный фотон, волновая теория предсказала, что «щелчки» фотоумножителя будут становиться все тише и тише, в то время как они сохраняли полную силу, и только раздавались все более редко. Ни одна разумная модель не могла объяснить этот факт, поэтому наступил период, требовавший известной хит-

торых на фотоумножители светили очень слабым светом, волновая теория потерпела крах. По мере того, как свет становился все более тусклым, фотоумножители продолжали издавать полновесные щелчки — только они раздавались все реже. Свет вел себя как частицы.

Сегодня ситуация такова, что у нас нет хорошей модели для объяснения частичного отражения от двух поверхностей; мы только вычисляем вероятность того, что в данный фотоумножитель попадет фотон, отраженный от стеклянной пластинки. Я выбрал эти вычисления в качестве первого примера, чтобы познакомить вас с методом квантовой электродинамики. Я собираюсь показать вам, «как мы считаем бобы»,— что делают физики, чтобы получить правильный ответ. Я не собираюсь объяснять, как фотоны в действительности «решают» вопрос, отскочить ли назад или пройти насквозь. Это неизвестно. (Возможно, вопрос не имеет смысла.) Я только покажу вам, как вычислить правильную *вероятность* того, что свет отразится от стекла данной толщины, потому что это единственное, что физики умеют делать! То, что нам приходится делать, чтобы решить *эту* задачу, аналогично тому, что приходится делать, чтобы решить *любую другую* квантово-электродинамическую задачу.

Вам придется напрячь силы — но не потому, что это трудно понять, а потому, что это скорее забавно: все, что нам надо будет делать — это рисовать маленькие стрелочки на листке бумаги — и больше ничего.

рости. Надо было знать, какой эксперимент вы анализируете, чтобы сказать, что такое свет — волны или частицы. Эта путаница была названа «корпускулярно-волновым дуализмом» света, и кто-то пошутил, что свет представляет собой волны по понедельникам, средам и пятницам; частицы — по вторникам, четвергам и субботам, а по воскресеньям мы думаем об этом. Цель этих лекций — рассказать о том, как эта загадка была в конце концов «разрешена».

Что же общего между стрелкой и вероятностью того, что определенное событие совершится? В соответствии с правилами, по которым «мы считаем бобы», вероятность события равна квадрату длины стрелки. Например, в нашем первом эксперименте (когда мы измеряли частичное отражение от одной только передней поверхности) вероятность того, что фотон попадает в фотоумножитель *A,* была равна 4 %. Это соответствует стрелке длиной 0,2, так как 0,2 в квадрате равно 0,04 (см. рис. 6).

В нашем втором эксперименте (когда мы заменяли тонкие стеклянные пластинки чуть более толстыми) фотоны,

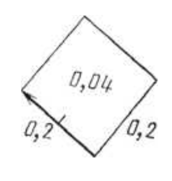


Рис. 6. Странная особенность частичного отражения от двух поверхностей заставила физиков отказаться от абсолютных предсказаний и ограничиться вычислением вероятности события. Квантовая электродинамика дает нам для этого метод, состоящий в рисовании стрелочек на листе бумаги. Вероятность события представлена площадью квадрата, стороной которого является стрелка. Например, стрелка, соответствующая вероятности 0,04 (4 %), имеет длину 0,2

отскакивая или от передней, или от задней поверхности, попадали в *A.* Как нарисовать стрелку, чтобы изобразить эту ситуацию? Длина стрелки должна меняться от нуля до 0,4, чтобы представить вероятности от нуля до 16 %, в зависимости от толщины стекла (см. рис. 7).

Начнем с того, что рассмотрим различные *пути,* по которым фотон мог попасть из источника в фотоумножитель *A.* Поскольку я делаю упрощение и считаю, что фотон отскакивает либо от передней, либо от задней поверхности, имеются два пути, по которым фотон мог попасть в *A.* В этом случае мы рисуем *две* стрелки — по одной для каждого способа, которым могло произойти событие — и затем соединя-

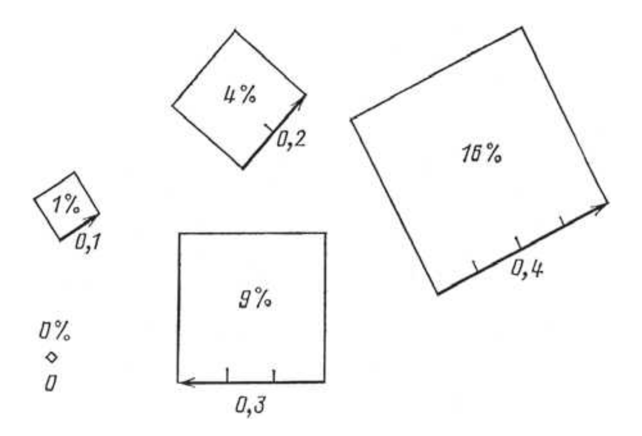


Рис. 7. Стрелки, соответствующие вероятностям от 0 до 16 %, имеют длины от 0 до 0,4

ем их в «результирующую стрелку», квадрат которой представляет собой вероятность события. Если бы событие могло произойти тремя различными способами, мы бы нарисовали три разные стрелки, прежде чем соединить их.

Теперь давайте я покажу, как соединять стрелки. Скажем, мы хотим соединить стрелку *x* со стрелкой *y* (см. рис. 8). Все, что требуется — это соединить «голову» *x* с «хвостом» *y* (не меняя их направлений) и провести результирующую стрелку от хвоста *x* к голове *y*. Вот и все. Мы можем соединять таким способом любое число стрелок. (Такая операция называется «сложением стрелок».) Каждая стрелка указывает, в каком

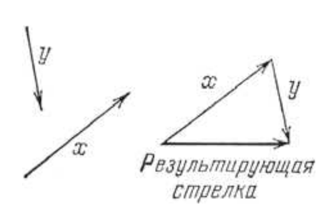


Рис. 8. Стрелки, отвечающие всем возможным способам, которыми могло бы произойти событие, рисуются и затем соединяются («складываются») так: соедините «голову» одной стрелки с «хвостом» другой (не меняя их направлений) и проведите «результирующую стрелку» от хвоста первой к голове последней

направлении и на какое расстояние «танцевать». Результирующая стрелка показывает, какое *единственное* движение надо сделать, чтобы попасть на то же место (см. рис. 9).

По каким правилам определяются длина и направление каждой из стрелок, которые мы соединяем, чтобы получить результирующую стрелку? В данном конкретном случае мы будем складывать две стрелки — первая будет представлять отражение от *передней* поверхности стекла, а вторая — от *задней*.

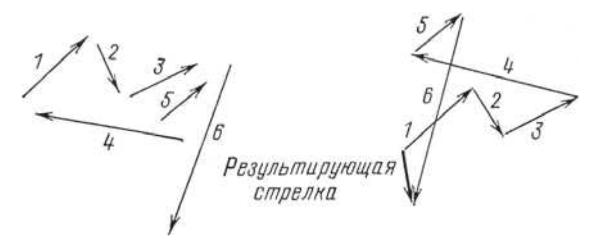


Рис. 9. Любое количество стрелок можно сложить способом, показанным на рис. 8

Начнем с длины. Как мы видели в первом эксперименте (в котором мы помещали фотоумножитель внутрь стекла), передняя поверхность отражает около 4 % вылетающих фотонов. Это значит, что стрелка «переднего отражения» имеет длину 0,2. Задняя поверхность также отражает 4 %, так что длина стрелки «заднего отражения» также 0,2.

Чтобы определить направление каждой стрелки, давайте представим себе, что у нас есть часы, которые идут, пока фотон летит. У этих воображаемых часов только одна стрелка и она вращается очень-очень быстро. Когда фотон летит, стрелка часов вращается (делая примерно 36 000 оборотов на дюйм пути фотона, если свет красный). Наконец, фотон попадает в фотоумножитель, и мы останавливаем часы. Стрелка часов останавливается, указывая в каком-то определенном направлении. В этом направлении и будет указывать стрелка, которую мы нарисуем.

Чтобы правильно вычислить ответ, нам потребуется еще одно правило. Когда мы имеем дело с траекторией движения фотона, отскочившего от *передней* поверхности стекла, мы меняем направление стрелки на обратное. Другими словами, мы рисуем стрелки так, что стрелка *заднего* отражения указывает в *том же* направлении, что и стрелка часов, а стрелка *переднего* отражения — в *противоположном* направлении.

Теперь давайте нарисуем стрелки для случая, когда свет отражается от очень тонкого слоя стекла. Чтобы нарисовать стрелку переднего отражения, мы представим себе, как фотон покидает источник света (стрелка часов начинает вращаться), отскакивает от передней поверхности и попадает в *A* (стрелка часов останавливается). Мы рисуем стрелочку длиной 0,2, указывающую в направлении, противоположном стрелке часов (см. рис. 10).

Чтобы нарисовать стрелку заднего отражения, представим себе, как фотон покидает источник света (стрелка часов

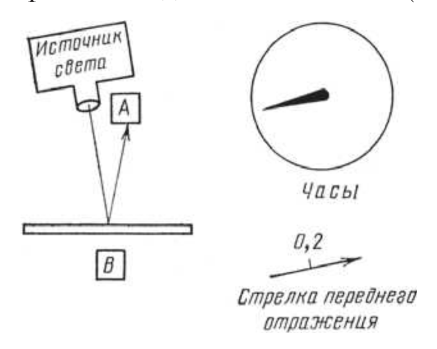


Рис. 10. В эксперименте с отражением от двух поверхностей мы можем сказать, что один фотон может попасть в *A* двумя способами: отразившись от передней или задней поверхности. Для каждого способа рисуется стрелка длиной 0,2, причем ее направление определяется стрелкой «часов», которая вращается, пока фотон движется. Стрелка «переднего отражения» рисуется в направлении, *обратном* остановившейся стрелке часов

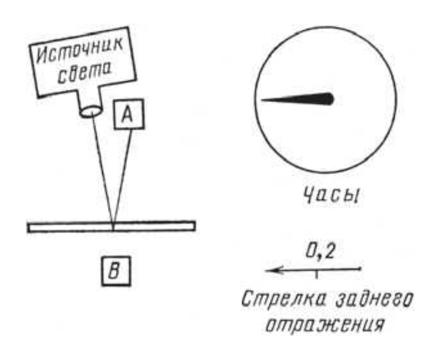


Рис. 11. Фотону, отразившемуся от задней поверхности тонкой стеклянной пластинки, требуется немного больше времени, чтобы попасть в *А*. Так что стрелка часов, остановившись, указывает слегка в другом направлении, чем когда мы имеем дело с фотоном, отразившимся от передней поверхности. Стрелка «заднего отражения» рисуется *в том же* направлении, что и стрелка часов

начинает вращаться), проходит сквозь переднюю поверхность, отскакивает от задней и попадает в *А* (стрелка часов останавливается). На этот раз стрелка часов указывает почти в том же направлении, потому что фотону, отразившемуся от задней поверхности стекла, требуется почти столько же времени, чтобы достичь *А* — он дважды проходит сквозь очень тонкий слой стекла. Следовательно, мы рисуем стрелочку длиной 0,2, указывающую в том же направлении, что и стрелка часов (см. рис. 11).

Теперь соединим обе стрелки. Так как они имеют одну длину и почти противоположные направления, то длина ре-

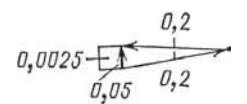


Рис. 12. Результирующая стрелка, квадрат которой представляет собой вероятность отражения от очень тонкого слоя стекла, получается при сложении стрелки переднего отражения и стрелки заднего отражения. Результат почти равен нулю

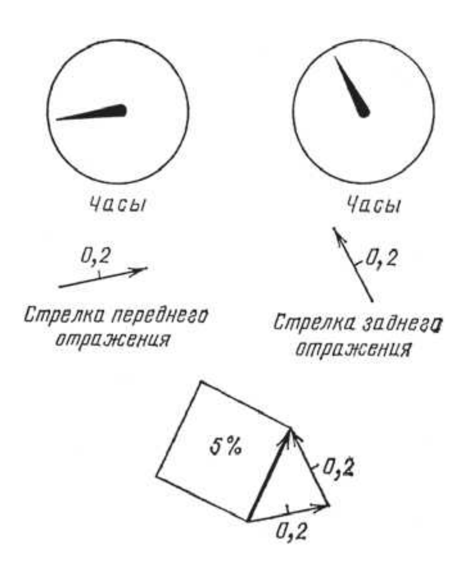


Рис. 13. Результирующая стрелка для чуть более толстой стеклянной пластинки несколько длиннее благодаря большему относительному углу между стрелками заднего и переднего отражения. Это связано с тем, что фотону, отразившемуся от задней поверхности, требуется больше времени, чтобы попасть в *A,* по сравнению с предыдущим примером

зультирующей стрелки будет практически равна нулю, а ее квадрат будет еще ближе к нулю. Таким образом, вероятность того, что свет отразится от бесконечно тонкой стеклянной пластинки, практически равна нулю (см. рис. 12).

Когда мы заменяем тончайшую стеклянную пластинку чуть более толстой, фотону, отскакивающему от задней поверхности, требуется чуть больше времени, чтобы попасть в *A*, чем в первом примере. Поэтому стрелка часов успевает повернуться чуть дальше, прежде чем остановиться, и стрелка заднего отражения находится под несколько большим углом к стрелке переднего отражения. Результирующая стрелка получается чуть длиннее, а ее квадрат, соответственно, возрастает (см. рис. 13).

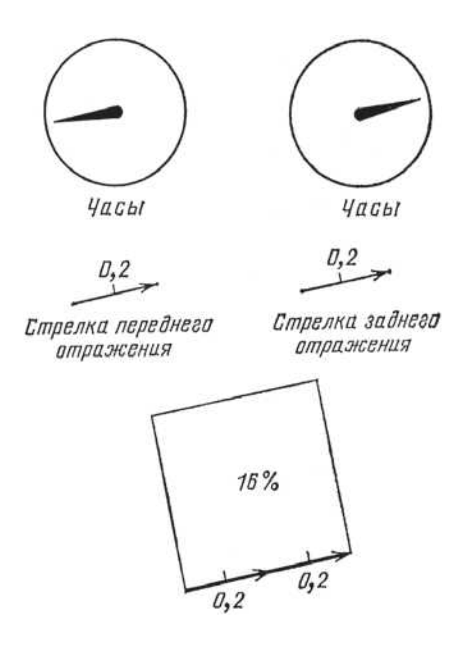


Рис. 14. Когда толщина стекла такова, что стрелка часов делает добавочный полуоборот для фотона, отразившегося от задней поверхности, стрелки переднего и заднего отражения указывают в одном направлении. Это дает результирующую стрелку длиной 0,4, что соответствует вероятности 16 %

В качестве следующего примера рассмотрим случай, когда стекло настолько толстое, что стрелка часов делает добавочный полуоборот за то время, что фотон отражается от задней поверхности. На этот раз стрелка заднего отражения указывает точно в том же направлении, что и стрелка переднего отражения. Соединяя обе стрелки, получаем результирующую стрелку длиной 0,4, квадрат которой равен 0,16, что соответствует вероятности 16 % (см. рис. 14).

Если мы увеличим толщину стекла настолько, чтобы стрелка часов сделала добавочный *полный* оборот за время полета с отражением от задней поверхности, то наши две стрелки будут опять указывать в противоположных направ-

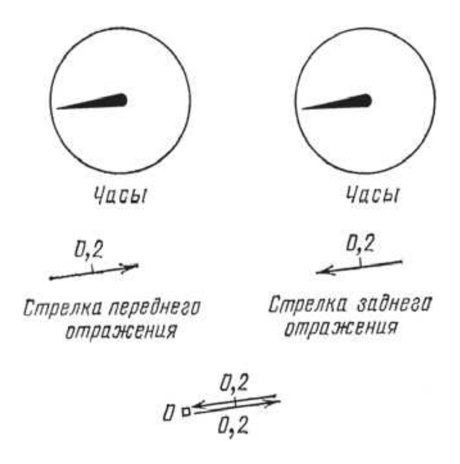


Рис. 15. Когда толщина стекла такова, что стрелка часов делает один или больше полных добавочных оборотов для фотона, отразившегося от задней поверхности, результирующая стрелка опять равна нулю, и отражения вообще нет

лениях и результирующая стрелка будет равна нулю (см. рис. 15). Это положение возникает снова и снова каждый раз, когда толщина стекла достаточна, чтобы стрелка часов сделала еще один полный оборот за время полета с отражением от задней поверхности.

Если толщина стекла такова, что стрелка часов делает добавочные 1/4 или 3/4 оборота, то две маленькие стрелочки будут направлены под прямым углом. В этом случае результирующая стрелка представляет собой гипотенузу прямо-

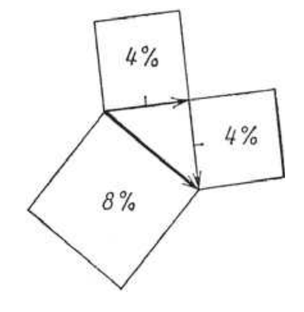


Рис. 16. Когда стрелки переднего и заднего отражения составляют прямой угол, результирующая стрелка представляет собой гипотенузу прямоугольного треугольника. Таким образом, ее квадрат равен сумме двух других квадратов – 8%

угольного треугольника, и, по теореме Пифагора, квадрат гипотенузы равен сумме квадратов катетов. Так мы получаем величину, правильную «дважды в сутки»; 4 % + 4 % дают 8 % (см. рис. 16).

Заметьте, что по мере того как мы постепенно увеличиваем толщину стекла, стрелка переднего отражения всегда указывает в одном направлении, тогда как стрелка заднего отражения постепенно меняет направление. Изменение относительного направления двух стрелок приводит к тому, что длина результирующей стрелки периодически меняется от нуля до 0,4. Таким образом, *квадрат* длины результирующей стрелки периодически меняется от нуля до 16 %, что мы и наблюдаем в наших экспериментах (см. рис. 17).

Только что я показал вам, как можно точно описать это странное частичное отражение, рисуя на бумаге какие-то нелепые стрелки. Специальное научное название этих стрелок — «амплитуда вероятности», и я чувствую себя более значительным, когда говорю: «Мы вычисляем амплитуду вероятности события». Однако я предпочитаю говорить просто, что мы пытаемся найти стрелку, квадрат длины которой является вероятностью того, что что-нибудь случится.

Прежде чем закончить эту первую лекцию, я хотел бы рассказать вам о радужных разводах, которые вы видите на мыльных пузырях. Или лучше о другом. Если масло из вашего автомобиля сочится в лужу, то, глядя на коричневое масло в грязной луже, вы увидите прекрасные переливы цветов. Тонкая пленка масла, плавающая на поверхности лужи, представляет собой что-то вроде очень тонкого стекла — она отражает свет одного цвета то слабо, то сильно в зависимости от своей толщины. Если мы будем светить чистым красным светом на масляную пленку, то увидим пятна красного цвета, разделенные узкими черными полосками (в тех местах, где нет отражения), так как толщина масляной пленки не везде одинакова. Если мы будем светить чистым синим светом, то

увидим пятна синего цвета, разделенные узкими черными полосками. Если мы будем светить одновременно красным и синим светом, мы увидим, что некоторые места имеют как раз такую толщину, что отражают только красный свет; другие имеют как раз такую толщину, что отражают только синий свет; еще какие-то места имеют такую толщину, что отражают и красный, и синий свет (наши глаза видят при этом фиолетовый), и, наконец, где-то толщина пленки такова, что вообще ничего не отражается, и пленка кажется черной.

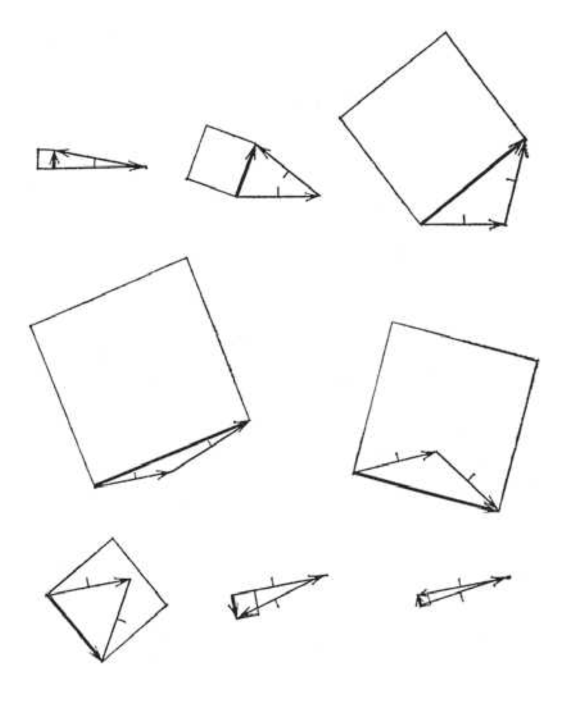


Рис. 17. Когда тонкое стекло заменяют более толстым, стрелка часов, отмеряющая время движения фотона, отраженного от задней поверхности, поворачивается чуть больше и относительный угол между стрелками переднего и заднего отражения меняется. Это приводит к тому, что результирующая стрелка снова и снова изменяет длину, а ее квадрат колеблется от 0 до 16 % и опять до 0

Чтобы лучше это понять, следует знать, что цикл от нуля до 16 % для частичного отражения от двух поверхностей повторяется чаще для синего света, чем для красного. Так что при определенной толщине тот или иной цвет или оба цвета отражаются сильно, в то время как при другой толщине отражение обоих цветов отсутствует (см. рис. 18). Циклы отражения повторяются с разной частотой, что соответствует тому, что стрелка часов вращается быстрее для синего фотона и медленнее для красного. На самом деле *единственное* раз-

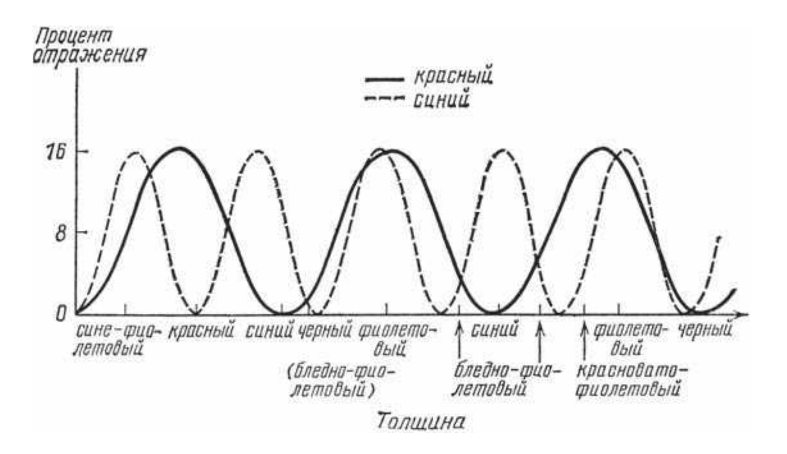


Рис. 18. По мере утолщения пластинки вероятность частичного отражения монохроматического света от двух поверхностей изменяется циклически от 0 до 16 %. Так как скорость воображаемой часовой стрелки различна для света различных цветов, цикл повторяется с различной частотой. Пусть на пластинку падают два чистых цвета — красный и синий свет. Тогда в зависимости от толщины пластинки будет отражаться или только красный, или только синий, или красный и синий свет вместе в различных соотношениях (что дает разные оттенки фиолетового), или ничего не будет отражаться (черный). Если, как у масла, растекающегося по луже, толщина слоя меняется, возникнут все комбинации. При освещении солнечным светом, состоящим из всех цветов, возникают всевозможные комбинации, что дает множество цветов

личие между красным и синим фотоном (или фотоном любого другого цвета, включая радиоволны, рентгеновское излучение и т. д.) — это скорость вращения стрелки часов.

Когда мы светим красным и синим светом на масляную пленку, появляются разводы красного, синего и фиолетового цветов, разделенные черными границами. Когда солнечный свет, состоящий из красного, желтого, зеленого и синего, падает на лужу с масляной пленкой, участки, сильно отражающие каждый из этих цветов, перекрываются и дают всевозможные сочетания, которые наши глаза видят как разные цвета. Когда масляная пленка расползается и движется по поверхности воды, разноцветные разводы постоянно меняются. (С другой стороны, если бы вы посмотрели на эту же лужу ночью, при свете натриевого уличного фонаря, вы бы увидели только желтоватые полосы, разделенные черным — потому что такие фонари испускают свет только одного цвета.)

Это появление разных цветов, вызываемое частичным отражением белого света от двух поверхностей, называется иризацией или радужностью и наблюдается во многих местах. Возможно, вы удивлялись, как получается переливчатая раскраска колибри и павлинов. Теперь вы знаете. Как возникли переливчатые цвета — это тоже интересный вопрос. Любуясь павлином, мы должны отдать должное поколениям тусклых самок за то, что они были так разборчивы в выборе себе пары. (Человек вышел на сцену позже и рационализировал селекцию павлинов.)

В следующей лекции я покажу вам, как при помощи этого забавного комбинирования стрелочек правильно рассчитать другие знакомые вам явления: что свет распространяется по прямой, что он отражается от зеркала под таким же углом, что и падает на него («угол падения равен углу отражения»), что линза фокусирует свет и т. д. Эта новая концепция опишет все, что вы знаете о свете.

Лекция 2

ФОТОНЫ: ЧАСТИЦЫ СВЕТА

Это вторая лекция цикла, посвященного квантовой электродинамике, и так как очевидно, что никого из вас не было на прошлой лекции (потому что я всех предупреждал, что никто ничего не поймет), я вкратце повторю основные положения первой лекции.

Мы говорили о свете. Первое важное свойство света заключается в том, что он состоит из частиц: когда очень слабый монохроматический свет (свет одного цвета) попадает в детектор, детектор щелкает с одинаковой громкостью и все реже и реже по мере того, как свет тускнеет.

Другое важное свойство света, обсуждавшееся в первой лекции,— это частичное отражение монохроматического света. От *единственной* поверхности стекла отражается в среднем 4 % всех попадающих на нее фотонов. Это уже неразрешимая загадка, так как невозможно предсказать, какие фотоны отразятся, а какие пройдут насквозь. Когда появляется *вторая* поверхность, результаты странные: вместо ожидаемых 8 % отражения от двух поверхностей частичное отражение то усиливается до 16 %, то совсем исчезает, в зависимости от толщины стекла.

Это странное явление частичного отражения от двух поверхностей может быть объяснено для интенсивного света

волновой теорией, но волновая теория не может объяснить, каким образом детектор издает одинаково громкие щелчки, когда свет тускнеет. Квантовая электродинамика «разрешает» вопрос о корпускулярно-волновом дуализме света, утверждая, что свет состоит из частиц (как считал в свое время Ньютон). Но ценой этого великого продвижения науки стало отступление физики на позицию, где признается возможным только вычисление *вероятности* того, что фотон попадет в детектор, и не предлагается хорошей модели того, как это в действительности происходит.

В первой лекции я рассказал, каким образом физики вычисляют вероятность того или иного события. Они рисуют на листе бумаги стрелки в соответствии со следующими правилами:

— ВЕЛИКИЙ ПРИНЦИП. Вероятность события равна квадрату длины стрелки, называемой «амплитудой вероятности». Например, стрелка длиной 0,4 соответствует вероятности 0,16, или 16%.

— ОБЩЕЕ ПРАВИЛО рисования стрелок, если событие может произойти разными способами: нарисовать стрелку для каждого способа и затем соединить стрелки («сложить» их), цепляя голову одной за хвост другой. «Результирующая стрелка» проводится от хвоста первой стрелки к голове последней. Квадрат результирующей стрелки дает вероятность всего события в целом.

Было также несколько специальных правил для проведения стрелок в случае частичного отражения от стекла (их можно найти на с. 36—39).

Все вышесказанное представляет собой беглый обзор первой лекции.

Теперь я хотел бы показать вам, как эта модель мира, так разительно отличающаяся от всего, с чем вы встречались до сих пор (что, возможно, вы надеетесь с ней никогда больше не встретиться), может объяснить все известные вам простые

свойства света: когда свет отражается от зеркала, угол падения равен углу отражения; свет отклоняется, попадая из воздуха в воду; свет распространяется по прямой; линза фокусирует свет и т. д. Теория также описывает многие другие свойства света, с которыми вы, возможно, и не знакомы. Самая большая трудность, с которой я столкнулся во время подготовки этих лекций, состояла в том, чтобы устоять перед искушением объяснить все вещи, связанные со светом, которые вы так долго изучали в школе. Например, отклонение света в область тени — то, что называется дифракцией. Но так как большинство из вас не наблюдало внимательно этих явлений, я не буду их касаться. Однако я могу гарантировать (в противном случае примеры, которые я собираюсь продемонстрировать, вводили бы вас в заблуждение), что *любое* явление, связанное со светом, которое было тщательно изучено, можно объяс-

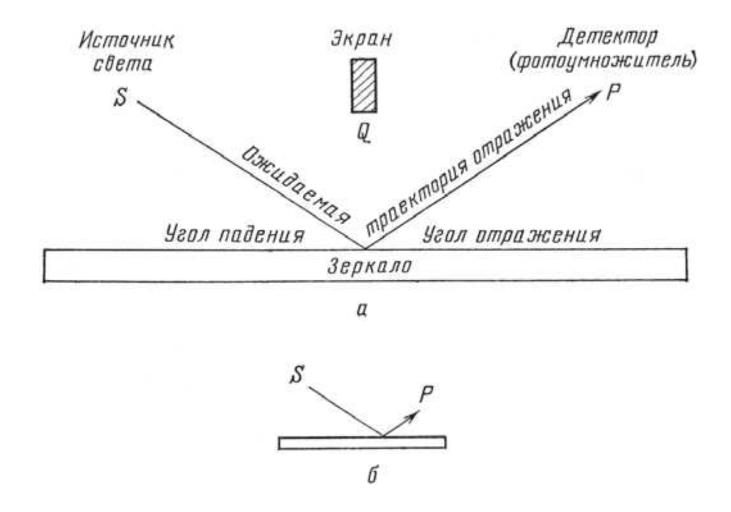


Рис. 19. Согласно классической картине мира зеркало будет отражать свет там, где угол падения равен углу отражения, даже если источник и детектор находятся на разных уровнях, как показано в случае *б*. [В дальнейшем на рисунках источник изображается буквой *S* (от source), фотоумножитель — *P* (от photomultiplier).— *Примеч. пер.]*

нить квантовой электродинамикой; хотя я буду описывать только простейшие и самые известные явления.

Начнем с зеркала и с вопроса о том, как от него отражается свет (см. рис. 19). В точке *S* имеется источник, испускающий очень слабый свет одного цвета (возьмем опять красный цвет). Источник испускает каждый раз по одному фотону. В точку *P* поставим фотоумножитель, чтобы детектировать фотоны. Поставим его на той же высоте, что и источник — будет проще рисовать стрелки, если все симметрично. Мы хотим вычислить вероятность того, что детектор щелкнет после вылета фотона из источника. Так как фотон может полететь прямо в детектор, поставим экран в *Q*, чтобы это предотвратить.

Мы могли ожидать, что весь свет, достигающий детектора, должен отражаться от середины зеркала, так как именно в этом месте угол падения равен углу отражения. И кажется довольно очевидным, что части зеркала вблизи обоих его концов имеют такое же отношение к отражению, как к цене сыра, не так ли?

Хотя вы можете *думать,* что части зеркала вблизи обоих концов не имеют никакого отношения к отражению света, попадающего из источника в детектор, давайте посмотрим, что может сказать по этому поводу квантовая теория. П р а в и л о: вероятность того, что данное событие произойдет, равна квадрату результирующей стрелки, которую найдем, начертив стрелки для каждого способа, которым может произойти событие, и затем соединив («сложив») их. В эксперименте по измерению частичного отражения света от двух поверхностей было два пути, которыми фотон мог попасть из источника в детектор. В этом эксперименте (отражение от одной поверхности) фотон может лететь миллионом различных путей: он может попасть в левую часть зеркала в *A* или в *B* (например) и отскочить в детектор (см. рис. 20); он может отскочить от той части, от какой он, по вашему мнению, и должен отскакивать — от *G*; или он может попасть в

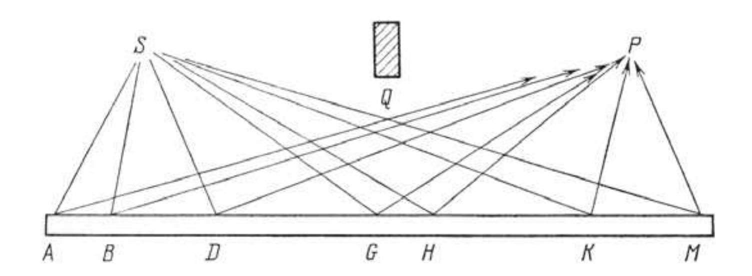


Рис. 20. Согласно квантовой картине мира свет имеет одинаковую амплитуду отразиться от любой части зеркала, от *A* до *M*

правую часть зеркала в *K,* или *M* и отскочить оттуда. Вы можете подумать, что я сошел с ума, так как в большинстве названных мною случаев угол падения не равен углу отражения. Но я *не* сошел с ума, потому что в действительности свет распространяется именно так! Как это может быть?

Чтобы упростить проблему, предположим, что зеркало представляет собой только длинную полоску слева направо, т. е. забудем на минуту, что зеркало имеет толщину и возвышается над бумагой (см. рис. 21). Хотя в действительности на этой зеркальной полоске имеется миллион мест, откуда мог бы отразиться фотон, приближенно допустим, временно разделив зеркало на конечное число маленьких квадратиков, что есть только одна траектория для каждого квадратика. Наш расчет будет более точным (но и производить его станет труднее) по мере того, как мы будем уменьшать квадратики и рассматривать большее количество траекторий.

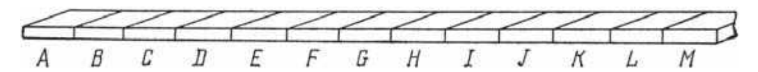


Рис. 21. Чтобы легче было вычислить, где проходит свет, будем временно рассматривать только полоску зеркала, разделенную на квадратики. Каждому квадратику соответствует одна траектория. Это упрощение никоим образом не уводит в сторону от точного анализа ситуации

Теперь нарисуем стрелку для каждого способа, которым свет может распространяться в этой ситуации. Каждая стрелка имеет определенную длину и направление. Рассмотрим сначала длину. Вы можете подумать, что стрелка, которую мы проведем для траектории, проходящей через середину зеркала *G,* будет самой длинной (так как кажется, что очень велика вероятность того, что фотон, попадающий в детектор, летит именно так), а стрелки для траекторий, проходящих через концы зеркала, будут очень короткими. Нет-нет, мы не должны устанавливать такие произвольные правила. А настоящее правило — и то, что на самом деле происходит,— гораздо проще: фотон, попадающий в детектор, имеет почти равные шансы попасть туда *любым* путем, так что все стрелки будут иметь почти одинаковую длину. (В действительности имеются очень небольшие различия в длине, связанные с различием в углах и расстояниях, но они настолько незначительны, что я их просто не буду учитывать.) Так что давайте условимся, что все нарисованные нами стрелки будут иметь некую произвольную одинаковую длину — я сделаю их очень короткими, потому что у нас будет очень много этих стрелок, изображающих множество возможных траекторий света (см. рис. 22).



Рис. 22. Каждый путь, по которому может идти свет, будет представлен в наших вычислениях стрелкой произвольной стандартной длины (как показано)

Хотя можно смело предположить, что все стрелки будут иметь почти одинаковую длину, они будут направлены поразному, так как время пути по каждой траектории различно. Как вы помните из первой лекции, направление данной стрелки определяется конечным положением стрелки воображаемых часов, измеряющих время движения фотона по данной траектории. Ясно, что фотону, который попадает сначала в левый конец зеркала, а затем в детектор, требуется больше времени, чем фотону, попадающему в детектор из

середины зеркала G (см. рис. 23). Или представьте на минуту, что вы очень торопитесь, а вам надо добежать от источника до зеркала, а оттуда попасть в детектор. Вы, конечно, понимаете, что глупо будет отправиться сначала в *A*, и потом проделывать весь долгий путь до детектора; гораздо быстрее будет коснуться зеркала где-нибудь в середине.

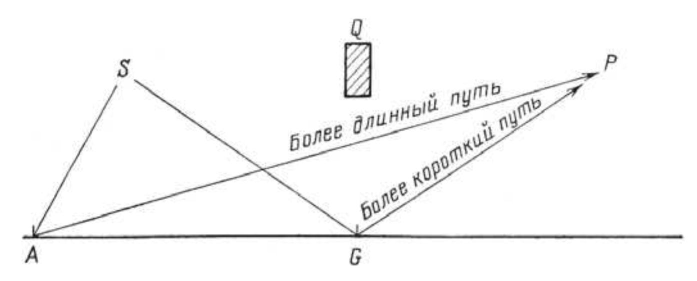


Рис. 23. В то время как длина стрелок существенно не меняется, направление будет различным, потому что фотону требуется разное время для движения по разным траекториям. Ясно, что время прохождения пути *S—A—P* больше, чем время прохождения пути *S—G—P*

Чтобы нам легче было вычислить направление каждой стрелки, я нарисую график прямо под зеркалом (см. рис. 24). Под каждой точкой зеркала, откуда мог отразиться свет, я отмечу по вертикали, сколько времени понадобилось бы свету, если бы он двигался именно по этой траектории. Чем больше времени понадобится, тем выше будут точки на графике. Начнем слева. Сначала фотону требуется довольно много времени, чтобы пролететь по траектории, имеющей точку отражения в *A,* так что поставим точку довольно высоко на графике. По мере продвижения к середине зеркала фотону требуется все меньше времени, чтобы проделать свой путь, поэтому ставим каждую следующую точку ниже предыдущей. После того как мы пройдем через центр, время полета фотона по каждой следующей, последовательно взятой траектории опять начнет увеличиваться, поэтому мы будем ставить наши точки соответственно все выше и выше.

Для наглядности соединим точки: они образуют симметричную изогнутую кривую, которая начинается наверху, опускается и снова поднимается наверх.

Что это значит в смысле направления стрелок? Направление каждой отдельной стрелки соответствует тому, сколько времени понадобится фотону, чтобы попасть из источника в детектор по определенной траектории. Будем рисовать стрелки, начиная слева. Движение по траектории *A* требует больше всего времени, ее стрелка указывает в каком-то направлении (рис. 24). Стрелка для траектории *B* указывает в другом направлении, так как время движения по ней другое. В середине зеркала стрелки *F*, *G* и *H* указывают почти в одном направлении, потому что время для них почти одинаково. Пройдя через центр зеркала, мы увидим, что каждая траектория с правой стороны зеркала соответствует траектории с точно таким же временем с левой стороны (это следствие того, что мы установили источник и детектор на одной высоте и точку *G* поставили точно в центре). Таким образом, стрелка, например для траектории *J,* направлена точно так же, как стрелка для траектории *D.*

Теперь давайте складывать стрелки (рис. 24). Начиная со стрелки *A,* мы цепляем стрелки одну к другой, головой к хвосту. Теперь представим себе, что мы отправились на прогулку, а каждая стрелка соответствует одному шагу. Сначала мы уйдем недалеко, так как направление движения сильно меняется от одного шага к другому. Но через некоторое время стрелки начинают показывать примерно в одном направлении, и мы продвигаемся. А к концу прогулки направление от одного шага к другому опять резко меняется, и мы опять топчемся на месте.

Все, что остается теперь сделать,— провести результирующую стрелку. Мы просто соединяем хвост первой стрелки с головой последней и видим, насколько мы продвинулись в нашей прогулке (рис. 24). И обратите внимание — мы получили довольно длинную результирующую стрелку! Кван-

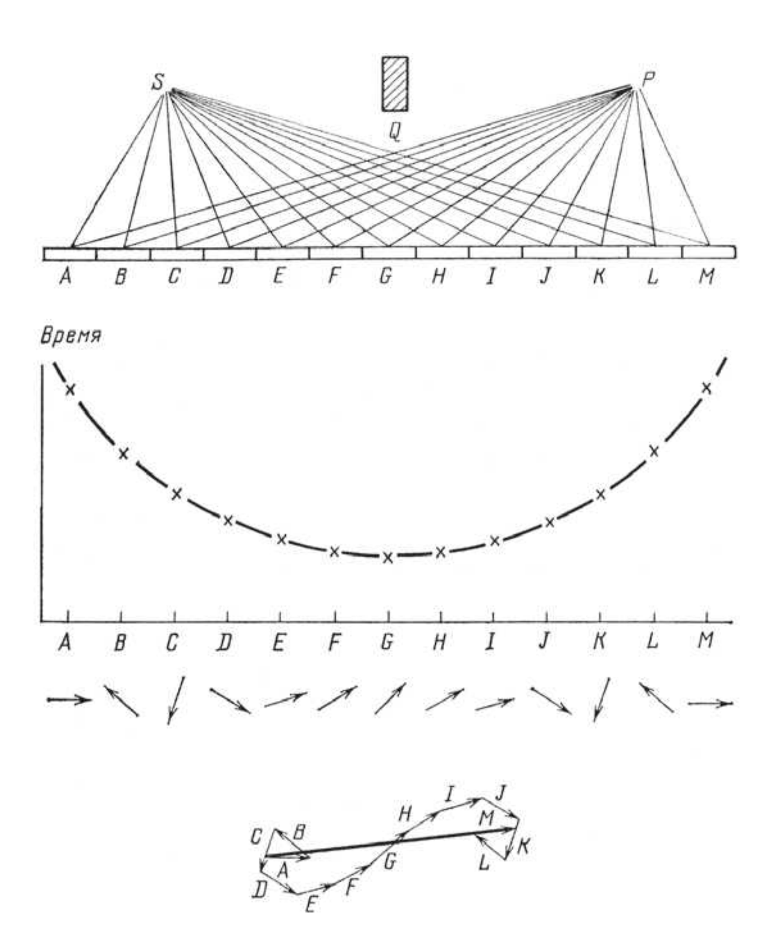


Рис. 24. Все пути, по которым мог бы пойти свет (в этом упрощенном случае), показаны наверху, а крестиками на графике (ниже) отмечено время, необходимое фотону для прохождения пути от источника до фотоумножителя через данную точку зеркала. Под графиком изображено направление каждой стрелки. А еще ниже — результат сложения всех стрелок. Очевидно, что основной вклад в результирующую стрелку вносят стрелки от *E* до *J,* направленные почти одинаково, так как движение по соответствующим траекториям занимает почти одинаковое время. В том же месте общее время минимально. Поэтому приближенно можно допустить, что свет идет по тому пути, который занимает меньше всего времени

товая электродинамика предсказывает, что свет действительно, должен отражаться от зеркала!

Теперь давайте разберемся. Что определяет длину результирующей стрелки? Мы замечаем целый ряд вещей. Прежде всего концы зеркала не играют существенной роли: там стрелки кружат и никуда не приводят. Если бы я отрезал концы зеркала — те части, возня с которыми, как вы инстинктивно чувствовали, была пустой тратой времени, это едва ли повлияло бы на длину результирующей стрелки.

Итак, где же та часть зеркала, которая в основном и определяет длину результирующей стрелки? Это та часть, где все стрелки направлены почти в одну сторону, потому что у них почти *одинаковое время*. Посмотрев на график, изображающий время для каждой траектории, вы увидите, что время почти одинаково для двух соседних траекторий внизу кривой, там, где *время наименьшее*.

Итак, наименьшее время там, где оно почти одинаково для соседних траекторий, где стрелки указывают почти в одном направлении и при сложении дают значительную длину. Именно там определяется вероятность отражения фотона от зеркала. Вот почему в грубом приближении приемлемо упрощенное представление о мире, согласно которому свет идет там, где *время наименьшее* (и легко доказать, что там, где время наименьшее, угол падения равен углу отражения, но у меня нет времени, чтобы вам это показать).

Таким образом, квантовая электродинамика дала правильный ответ — именно середина зеркала важна для отражения — но этот правильный результат получен за счет допущения, что свет отражается от всего зеркала и при помощи сложения множества стрелочек, которые были нужны только для того, чтобы взаимно уничтожиться. Все это может вам показаться пустой тратой времени — глупой игрой в математику. Это вовсе не похоже на настоящую физику — иметь дело с чем-то, что только исчезает!

Давайте при помощи другого эксперимента проверим идею, что отражение *действительно происходит от всей* поверхности зеркала. Во-первых, отсечем большую часть зеркала и оставим около четверти его с левой стороны. У нас все еще имеется довольно большой кусок зеркала, только находится он в другом месте. В предыдущем эксперименте стрелки с левой стороны зеркала указывали в самых разных направлениях из-за большой разницы во времени между соседними траекториями (рис. 24). В этом эксперименте я собираюсь произвести более

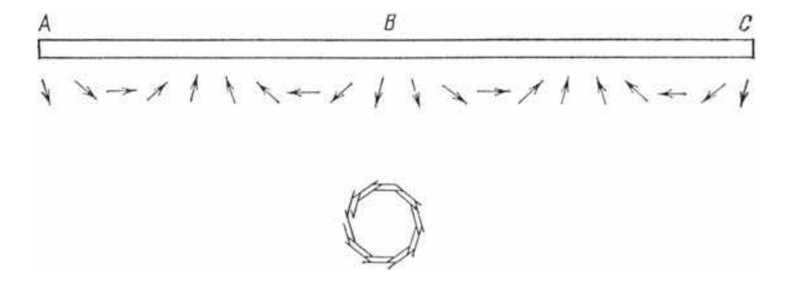


Рис. 25. Для проверки предположения, что в действительности отражение происходит и на концах зеркала (но просто нейтрализуется и сводится на нет), поместим большое зеркало в неподходящее для отражения из *S* в *P* место (см рис. 24). Это зеркало разделено на гораздо меньшие кусочки, так, чтобы разница во времени для двух соседних траекторий была невелика. Сложение всех стрелок ничего не дает: они идут по кругу, и сумма их ничтожна

детальный расчет, используя гораздо меньшие интервалы между траекториями в левой части зеркала — настолько маленькие, что между соседними путями не будет большого различия во времени (см. рис. 25). На этой более детальной иллюстрации видно, что одни стрелки указывают больше вправо; другие — больше влево. Если мы сложим *все* стрелки, то получим, по существу, кольцо и нулевую результирующую стрелку.

Но давайте предположим, что мы аккуратно процарапали зеркало в тех участках, где стрелки склоняются в одну какую-то

сторону — допустим, влево — так что останутся только участки, где стрелки указывают в основном в другую сторону (см. рис. 26). Сложив стрелки, направленные более или менее вправо, мы получаем последовательность «прогибов» и довольно значительную результирующую стрелку — согласно теории у нас должно теперь быть сильное отражение! И действительно, оно есть — теория *правильна*! Такое зеркало называется дифракционной решеткой, и его действие похоже на волшебство.

Не удивительно ли это — вы берете кусочек зеркала, где вы не ожидаете увидеть никакого отражения, сцарапываете часть его, и оно отражает!*

Та решетка, которую я только что вам показал, была сделана специально для красного света. Она не действует, если свет синий; нам пришлось бы сделать другую, с вырезами, расположенными ближе друг к другу, потому что, как я говорил на первой лекции, стрелка часов крутится быстрее для синего фотона, чем для красного. Поэтому вырезы, рассчитанные специально на «красную» частоту вращения, приходятся на неправильные места для синего света; стрелки сбиваются, и решетка работает не очень хорошо. Но оказывается, что если мы передвинем фотоумножитель и поставим его под несколько иным углом, то решетка, сделанная для красного света, заработает для синего. Эта счастливая случайность является следствием геометрии (см. рис. 27).

Если вы будете светить на решетку белым светом, красный свет отразится в одном направлении, оранжевый в дру-

---

*Участки зеркала, стрелки которых направлены в основном влево, также дают сильное отражение (когда уничтожены участки, стрелки которых направлены в обратную сторону). Отражение исчезает, когда имеются и «левые», и «правые» участки зеркала. Это аналогично случаю частичного отражения от двух поверхностей: каждая поверхность отражает сама по себе, но если толщина становится такой, что обе поверхности дают противоположно направленные стрелки, отражение исчезает.

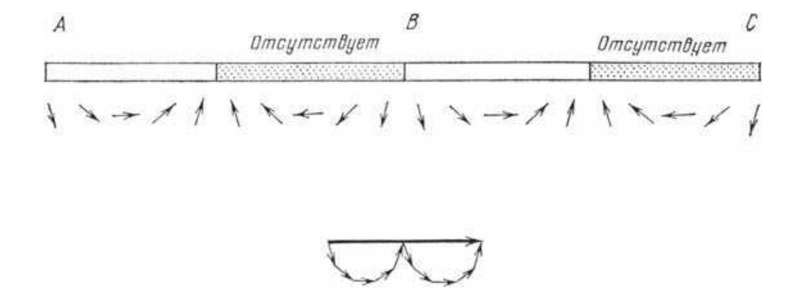


Рис. 26. Если сложить только стрелки, направленные в одну сторону (допустим, вправо) и пренебречь остальными (вытравив зеркало в этих местах), то от помещенного в неподходящее место зеркала отразится достаточное количество света. Такое протравленное зеркало называется дифракционной решеткой

гом (чуть выше), за ним желтый, зеленый, голубой — все цвета радуги. Радужные цвета часто видны там, где рядом расположено много желобков — например, когда вы при ярком свете под правильным углом держите грампластинку (или, *лучше,* видеодиск). Возможно, вы видели замечательные серебристые значки (здесь, в солнечной Калифорнии, их особенно часто прикрепляют сзади на машины): когда машина едет, вы видите очень яркие цвета, переливающиеся от

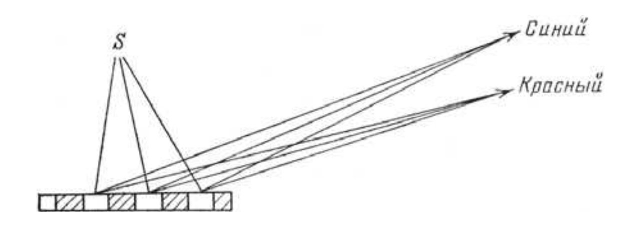


Рис. 27. Дифракционная решетка с бороздками на определенном расстоянии, которая годится для красного света, годится также и для других цветов, но для этого нужно поместить детектор в другое место. Таким образом, можно увидеть, как от рифленой поверхности — например от грампластинки — отражаются разные цвета в зависимости от угла зрения

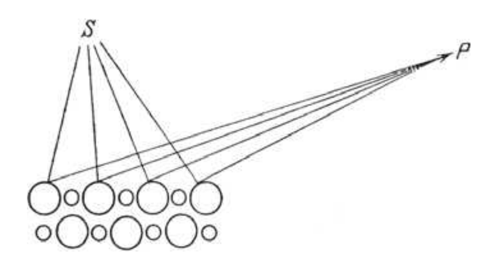


Рис. 28. Природа создала много типов дифракционных решеток в виде кристаллов. Кристалл соли отражает рентгеновские лучи (свет, для которого воображаемая стрелка часов движется чрезвычайно быстро,— скажем, в 10 000 раз быстрее, чем для видимого света) под различными углами, что дает возможность точно определить расположение отдельных атомов и расстояние между ними

красного к синему. Теперь вы знаете, откуда берутся цвета: вы смотрите на решетку — зеркало, процарапанное как раз в нужных местах. Солнце — это источник света, а ваши глаза — детектор. Я мог бы продолжить и легко объяснить вам, как устроены лазеры и голограммы, но я знаю, что не все их видели, и к тому же есть много других вещей, о которых я должен рассказать*.

---

* Не могу не рассказать вам о решетке, созданной самой природой. Кристаллы поваренной соли — это атомы натрия и хлора, упакованные упорядоченным образом. Их чередование, подобно гофрированной поверхности, действует как решетка, когда кристаллы освещены определенным светом (в данном случае рентгеновскими лучами). Найдя определенные места, где детектор регистрирует сильное отражение (называемое дифракцией), можно точно определить, каково расстояние между полосами и, следовательно, каково расстояние между атомами (см. рис. 28). Это прекрасный способ определения структуры всевозможных кристаллов, а также подтверждение того, что рентгеновские лучи — это тоже свет. Такие эксперименты были впервые проведены в 1914 г. Как это было захватывающе — впервые во всех подробностях увидеть, как расположены атомы в различных веществах.

Итак, решетка показывает, что мы не можем игнорировать те части зеркала, которые на первый взгляд ничего не отражают; пойдя с зеркалом на некоторые хитрости, мы можем продемонстрировать реальность отражения от всех частей зеркала и вызвать поразительные оптические явления.

И что более важно, реальность отражения от *всех* частей зеркала показывает, что амплитуда — стрелка — существует для *каждого способа,* которым может произойти событие. И чтобы правильно вычислить вероятность события в различных обстоятельствах, мы должны складывать стрелки для каждого способа, каким могло бы произойти событие, а не только для способов, которые кажутся нам наиболее важными!

Теперь я хотел бы поговорить о более знакомых вещах, чем решетки,— о том, как свет переходит из воздуха в воду. На этот раз поместим фотоумножитель под водой — мы полагаем, что экспериментатор может это устроить! Источник света находится в воздухе в точке *S,* а детектор под водой в точке *D* (см. рис. 29). Как и прежде, мы хотим вычислить вероятность того, что фотон попадет из источника света в детектор. Чтобы это вычислить, мы должны принять во внимание все возможные пути, по которым мог идти свет. Каждый путь вносит свою стрелочку, и, как и в предыдущем примере, все стрелочки имеют почти одинаковую длину. Мы опять можем построить график времени движения фотона по каждой из возможных траекторий. График будет представлять собой кривую, очень похожую на ту, что мы начертили для света, отраженного от зеркала: она начинается высоко, опускается и опять поднимается. Наибольший вклад дают те места, где стрелки указывают почти в одном направлении (где время почти не меняется от траектории к траектории), что соответствует нижней части кривой. Там же будет и наименьшее время, так что все, что нам надо сделать, это найти, где время наименьшее. Получается так, что свет распространяется в воде как бы медленнее, чем в воздухе (почему, я

объясню в следующей лекции), что делает пробег по воде, так сказать, более «дорогостоящим», чем пробег по воздуху. Не трудно понять, движение по какому пути занимает мень-

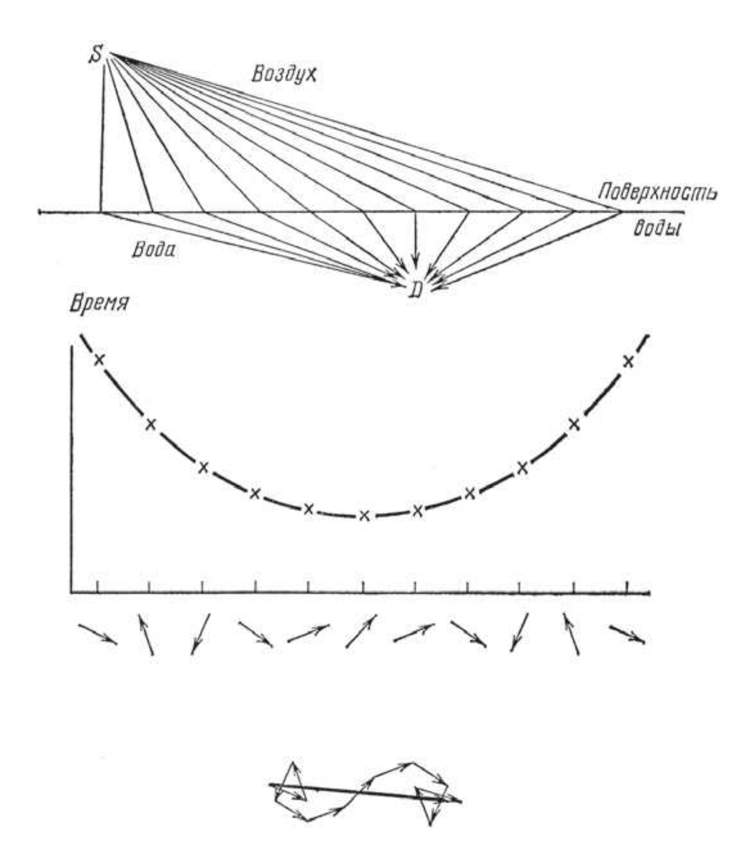


Рис. 29. Согласно квантовой теории свет может попасть из источника, находящегося в воздухе, в детектор, находящийся под водой, разными путями. Если упростить задачу, как в случае с зеркалом, можно нарисовать график, показывающий время каждой траектории, а под ним — направление каждой стрелки. И опять основной вклад в длину результирующей стрелки вносят те траектории, чьи стрелки указывают почти в одном направлении, так как у них почти одинаковое время, и снова для этих траекторий время будет наименьшим

ше всего времени: представьте себе, что вы спасатель, и сидите в точке *S,* а в точке *D* тонет красивая девушка (рис. 30). Вы бегаете по земле быстрее, чем плаваете по воде. Вопрос: где войти в воду, чтобы как можно скорее добраться до утопающей? Бежать к воде в точку *A* и потом чертовски быстро плыть? Нет, конечно. Но бежать прямо к несчастной и входить в воду в точке *J* — это тоже не самый быстрый путь. Конечно, в этих обстоятельствах спасателю глупо анализировать и вычислять, но маршрут, занимающий минимум времени, имеется, и его можно рассчитать: это компромисс между прямой дорогой через точку *J* и дорогой, где меньше всего воды, через точку *N.* Так же и со светом при вхождении в воду — траектория наименьшего времени проходит между точками *J* и *N,* скажем, в точке *L*.

Еще одно световое явление, о котором я хотел бы коротко упомянуть, это мираж. Когда едешь по сильно разогретому солнцем шоссе, то иногда кажется, что видишь на дороге лужи. На самом деле вы видите небо, а в нормальных условиях, если вы видите небо на дороге, то это потому, что дорога покрыта

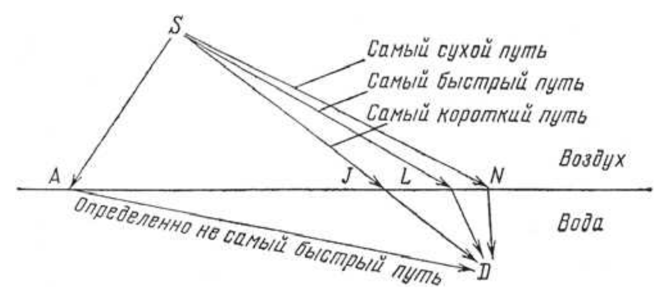


Рис. 30 Выбрать самый быстрый путь для света — все равно, что выбрать самый быстрый путь для спасателя, который сначала бежит, а затем плывет, чтобы спасти утопающего. На самом коротком пути надо слишком долго плыть; на пути, где меньше всего плыть, надо слишком долго бежать; самый быстрый путь — компромиссный между ними

лужами (частичное отражение света от одной поверхности). Но как вы можете увидеть небо на дороге, если на ней нет воды? Надо вам сказать, что свет распространяется в прохладном воздухе медленнее, чем в теплом, и, чтобы увидеть мираж, наблюдатель должен находиться в прохладном воздухе, слой которого расположен над слоем горячего воздуха, непосредственно над поверхностью дороги (см. рис. 31). Каким образом можно смотреть *вниз* и видеть небо, будет понятно, если найти траекторию наименьшего времени. Займитесь этим дома — об этом занятно подумать и это очень легко выяснить.

В рассмотренных нами примерах (свет отражается от зеркала и свет проходит через воздух, а затем через воду) я сделал некоторое допущение: для простоты я рисовал разные



Рис. 31. Нахождение самого быстрого пути объясняет, как устроен мираж. В теплом воздухе свет распространяется быстрее, чем в холодном. Кусочек неба представляется лежащим на дороге, так как часть света от неба попадает в глаза, отразившись от дороги. Нам кажется, что мы видим небо на дороге только в одном случае, когда оно отражается в воде. Поэтому мираж кажется нам водой

пути распространения света в виде ломаных линий — двух прямых, расположенных под углом друг к другу. Но мы не должны *принимать как должное* то, что свет распространяется по прямой в однородной среде, например в воде или в воздухе. Даже *это* объясняется общим принципом квантовой теории: вероятность события вычисляется при помощи сложения стрелок для *всех* способов, которыми могло произойти событие.

Итак, следующее, что я хочу показать вам,— это как, складывая стрелочки, увидеть, что свет распространяется по прямой. Поместим источник и фотоумножитель соответственно в точках *S* и *P* (см. рис. 32) и рассмотрим *все* пути— самые разнообразные кривые — по которым свет может попадать из источника в детектор. Потом мы нарисуем маленькую стрелку для каждого пути — и мы хорошо усвоили наш урок!

Для каждой кривой, например для траектории *A,* существует соседняя траектория, которая намного прямее и ощутимо короче,— т.е. движение по ней занимает намного меньше

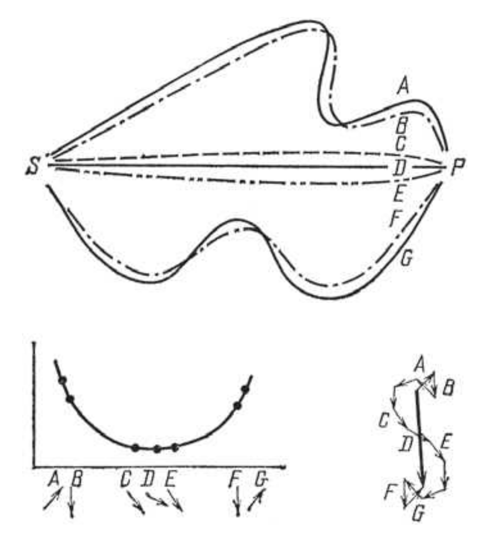


Рис. 32. При помощи квантовой теории можно объяснить, почему кажется, что свет распространяется по прямой. Изучение всех возможных траекторий показывает, что для каждой изогнутой траектории имеется близлежащая траектория, значительно более короткая, следовательно, требующая меньше времени (и существенно отличающаяся направлением стрелки). Только траектории, близкие к прямой траектории *D,* имеют стрелки, указывающие почти в одном направлении, так как у них почти одинаковое время. Важны только эти стрелки, так как из них складывается большая результирующая стрелка

времени. Но там, где траектории становятся почти прямыми — например в *C,* соседний, более прямой путь занимает почти такое же время. Вот там, где стрелки складываются, а не взаимно уничтожаются, там и идет свет.

Важно обратить внимание на следующее: единственная стрелка, соответствующая прямолинейной траектории через точку *D* (рис. 32), не может объяснить вероятности того, что свет попадет из источника в детектор по такому пути. Близкие, почти прямые траектории (через *C* и *E,* например) также играют важную роль. Поэтому свет *на самом деле* распространяется не только по прямой. Он «обнюхивает» соседние траектории вокруг нее и использует небольшую часть ближайшего пространства. (По этой же причине и зеркало должно быть достаточного размера, чтобы нормально отражать: если зеркало слишком мало для пучка соседних траекторий, свет рассеивается во многих направлениях, куда бы вы ни поставили зеркало.)

Давайте более тщательно исследуем этот пучок траекторий света, поместив источник в *S,* фотоумножитель в *P,* а между ними — два кубика, чтобы траектории света не расходились слишком далеко (см. рис. 33). Теперь поставим второй фотоумножитель в *Q*, под *P,* и опять будем считать, ради простоты, что свет может попасть из *S* в *Q* только по ломаным траекториям, состоящим из двух прямых отрезков. Что происходит? Когда промежуток между кубиками достаточно широк и может пропустить много соседних траекторий в *P* и в *Q*, стрелки для траекторий, ведущих в *P,* складываются (потому что все пути в *P* занимают почти одинаковое время), а стрелки для траекторий, ведущих в *Q,* взаимно уничтожаются (потому что между этими траекториями имеется значительная разница во времени). Так что фотоумножитель в *Q* не щелкает.

Но по мере сближения кубиков в какой-то момент детектор в Q начинает щелкать! Когда просвет почти закрыт и остается только несколько ближайших траекторий, стрелки траекторий, направленных в *Q, также* складываются, пото-

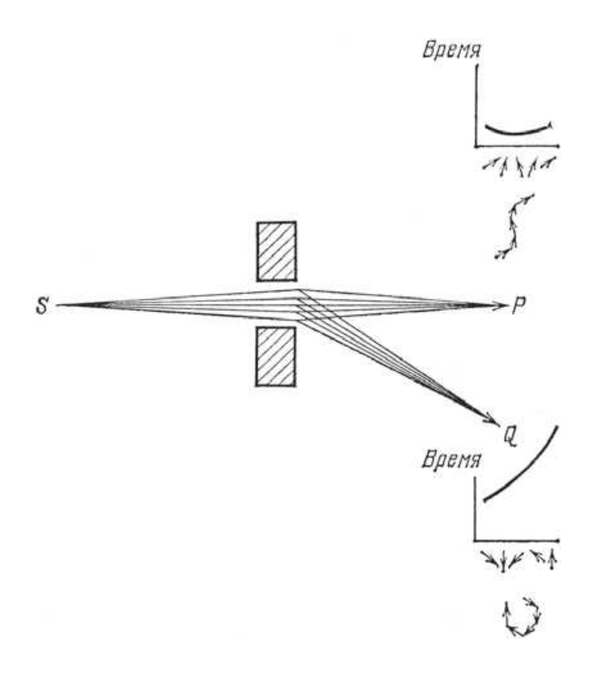


Рис. 33. Свет распространяется не только по прямой, но и по близлежащим траекториям. Когда два кубика раздвинуты настолько, чтобы между ними поместились эти соседние траектории, фотоны, как им и положено, летят в *P* и почти никогда не попадают в *Q*

му что и между ними почти не остается разницы во времени (см. рис. 34). Конечно, обе результирующие стрелки невелики, так что через такую маленькую дырочку ни в каком направлении не проникнет много света, но детектор в *Q* щелкает почти так же часто, как и в *P*! Следовательно, когда вы стараетесь слишком сильно сжать пучок света, чтобы заставить его распространяться только по прямой, он отказывается подчиняться и начинает расширяться*.

---

* Это пример действия «принципа неопределенности»: существует некая «дополнительность» между знанием того, где свет проходит между кубиками, и того, куда идет потом,— точное знание и того и другого невозможно. Я хотел бы поставить принцип неопределен-

Итак, представление о том, что свет распространяется прямолинейно,— это приближенное представление, которым удобно пользоваться при описании явлений знако-

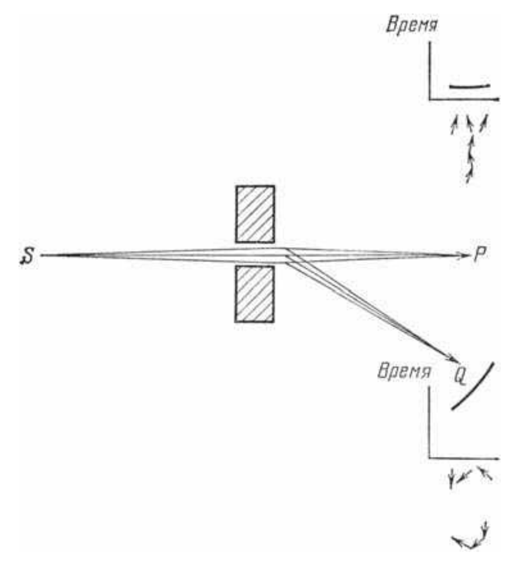


Рис. 34. Когда просвет сжат настолько, что остается только несколько траекторий, в *Q* попадет почти столько же просочившегося сквозь узкую щель света, сколько и в *P*. Это связано с тем, что осталось слишком мало стрелок, соответствующих траекториям, ведущим в *Q*, чтобы они могли нейтрализовать друг друга

ности на его историческое место: когда впервые стали высказываться революционные идеи квантовой физики, люди все еще пытались осмыслить их при помощи старомодных представлений (вроде того, что свет распространяется прямолинейно). Но в определенный момент старомодные представления начинали подводить, поэтому появилось предостережение, смысл которого был таков: «Ваши старомодные представления ни к черту не годятся, когда...» Если вы избавитесь от всех старомодных представлений и вместо этого будете пользоваться идеями, о которых я говорю в этих лекциях — будете складывать *стрелки* для всех способов, которыми может случиться событие,— принцип неопределенности будет не нужен!

мого нам мира; оно подобно грубому приближению, согласно которому угол отражения от зеркала равен углу падения.

Так же, как мы смогли при помощи некоторой хитрости заставить свет отражаться от зеркала под многими углами, мы можем похожим приемом заставить свет идти из одной точки в другую многими путями.

Прежде всего, чтобы упростить ситуацию, я нарисую вертикальную штриховую линию (см. рис. 35) между источником света и детектором (линия ничего не обозначает, это просто искусственная линия) и сообщу, что мы будем рассматривать только траектории, изображенные ломаными, которые состоят из двух отрезков. График, показывающий время для каждой траектории, выглядит так же, как и в случае с зеркалом (но на этот раз я поверну его боком): кривая начинается в *A,* наверху, затем она отклоняется влево, потому что траектории в середине короче и движение по ним занимает меньше времени. Наконец, кривая идет назад, вправо.

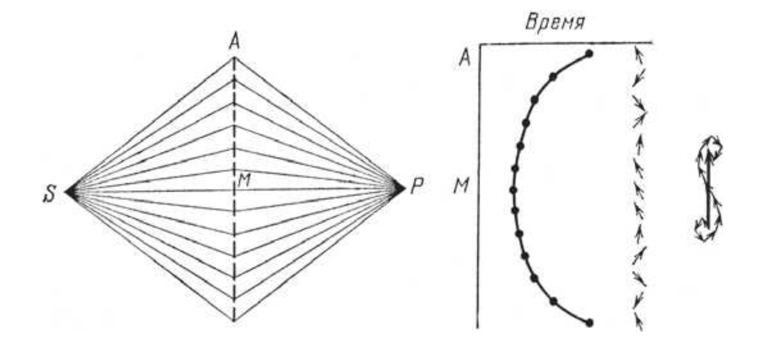


Рис. 35. Анализ всех возможных траекторий из *S* в *P* упрощается, если учитывать только ломаные линии с одним изломом (лежащие в одной плоскости). Результат такой же, как и в более сложном, реальном случае: получается кривая времени с минимумом в том месте, где набегает наибольший вклад в результирующую стрелку

Теперь немного развлечемся. Давайте «перехитрим свет» так, чтобы движение по *всем* траекториям занимало одинаковое время. Как это сделать? Каким образом самый короткий путь, через *M,* может занять точно такое же время, как и самый длинный путь, через *A*?

Мы знаем, что свет распространяется в воде медленнее, чем в воздухе; медленнее он распространяется и в стекле (с которым нам гораздо проще иметь дело!). Поэтому, поместив стекло нужной толщины на кратчайшем пути, проходящем

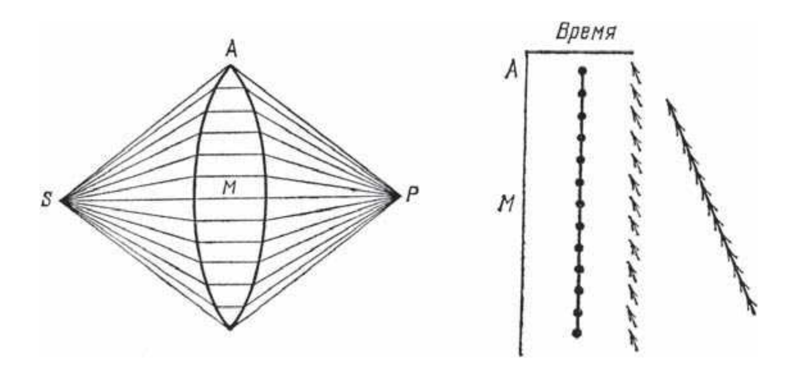


Рис. 36. Природу можно «обмануть», замедлив свет, идущий по более коротким траекториям. Для этого используется стекло такой толщины, чтобы движение по всем траекториям занимало одно и то же время. При этом все стрелки указывают в одном направлении и дают огромную результирующую стрелку — очень много света! Такое стекло, служащее для увеличения вероятности того, что свет из источника соберется в одной точке, называется фокусирующей линзой

через *M,* мы можем сделать так, что время для этой траектории будет в точности равно времени для траектории, проходящей через *A.* Траектории, соседние с *M,* чуть длиннее, и там не потребуется такое толстое стекло (см. рис. 36). Чем ближе мы подходим к *A,* тем тоньше должно быть стекло, которое надо ставить, чтобы замедлить свет. Если мы все тщательно рассчитаем и подберем для каждой траектории

стекло нужной толщины, чтобы увеличить время движения, то все интервалы времени получатся одинаковыми. Когда мы нарисуем стрелки для каждого пути, по которому мог бы пойти свет, мы увидим, что нам удалось одинаково развернуть все стрелки — а ведь этих стрелочек *миллионы* — и конечный результат будет представлять собой необыкновенно длинную, просто громадную результирующую стрелку! Вы, конечно, догадались, что я описываю: это фокусирующая линза. Уравнивая все интервалы времени, мы можем фокусировать свет — мы можем получить очень высокую вероятность того, что свет попадет в определенную точку, и очень низкую — что он появится где-нибудь еще.

Я привел эти примеры, чтобы показать вам, как квантовая электродинамика, которая на первый взгляд кажется абсурдной, лишенной причинности, наглядного механизма и не имеющей отношения к реальности, тем не менее воспроизводит явления, с которыми вы хорошо знакомы: отражение света от зеркала, преломление света при переходе из воздуха в воду, фокусирование света линзой. Она также воспроизводит и другие явления, которых вы, вероятно, и не наблюдали — такие, как дифракция на решетке, и целый ряд других вещей. На самом деле теория успешно объясняет *все* световые явления.

Я показал вам, как вычислять вероятность события, которое может произойти *различными взаимоисключающими способами:* мы рисуем стрелку для каждого способа, которым может произойти событие, и складываем стрелки. «Сложение стрелок» означает, что стрелки соединяются так, что голова одной примыкает к хвосту другой, и проводится «результирующая стрелка». Квадрат полученной результирующей стрелки представляет собой вероятность события.

Чтобы вы смогли полнее почувствовать «вкус» квантовой теории, я хочу теперь показать вам, как физики вычисляют вероятность составных событий, т.е. таких событий, которые можно разбить на последовательность отдельных этапов, или таких, которые состоят из некоторого числа независимых событий.

Пример составного события можно получить, видоизменив наш первый эксперимент, в котором мы направляли красные фотоны на единственную поверхность стекла и измеряли частичное отражение. Вместо того чтобы помещать в *A* фотоумножитель (см. рис. 37), поставим туда экран с отверстием, через которое будут пролетать фотоны, достигшие точки *A*. Далее, поместим в *B* стеклянную пластинку, а в *C*

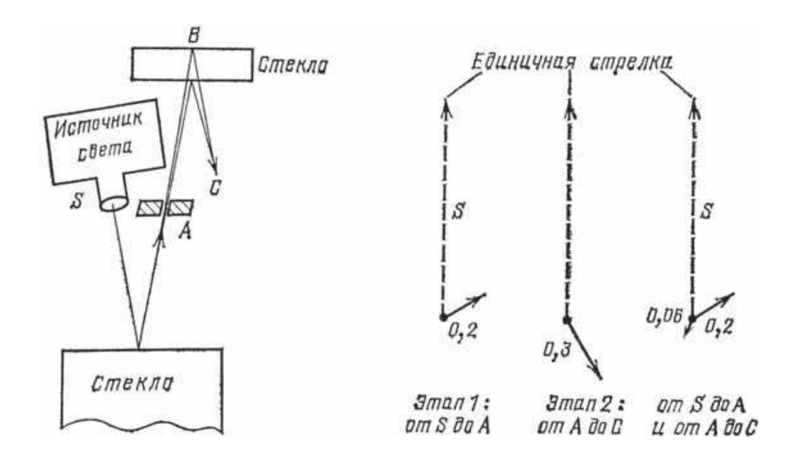


Рис. 37. Анализируя составное событие, можно разделить его на последовательные этапы. В этом примере траекторию фотона *S*—*C* можно разделить на два этапа: 1) фотон летит из *S* в *A* и 2) фотон летит из *A* в *C*. Можно анализировать каждый этап по отдельности и каждую стрелку рассматривать по-новому: как единичную стрелку (стрелку длиной 1, указывающую на 12 часов), подвергнутую сжатию и повороту. В этом примере сжатие и поворот для 1-го этапа составляют 0,2 и 2 часа; сжатие и поворот для 2-го этапа составляют 0,3 и 5 часов. Чтобы получить амплитуду двух последовательных этапов, мы последовательно сжимаем и поворачиваем. Сначала сжимаем единичную стрелку до 0,2 и поворачиваем на 2 часа, затем сжимаем полученную стрелку до 0,3 и поворачиваем на 5 часов (как если бы она была единичной стрелкой). В результате получаем стрелку длиной 0,06, повернутую на 7 часов. Эта последовательность поворотов и сжатий называется «умножением» стрелок

фотоумножитель. Как вычислить вероятность того, что фотон попадет из источника в *C*?

Это событие можно рассматривать как последовательность двух этапов. Э т а п 1: фотон летит из источника в точку *A*, отразившись от единственной поверхности стекла. Э т а п 2: фотон летит из точки *A* в фотоумножитель в *C*, отразившись от стеклянной пластинки в *B*. У каждого этапа имеется результирующая стрелка — *«амплитуда»* (я буду употреблять то одно, то другое слово) — которую можно вычислить по уже известным нам правилам. Амплитуда первого этапа имеет длину 0,2 (квадрат ее равен 0,04, это вероятность отражения от единственной поверхности стекла) и направлена под некоторым углом — скажем, указывает на 2 часа (рис. 37).

Чтобы вычислить амплитуду второго этапа, мы временно поместим источник света в *A* и направим фотоны на стеклянную пластинку наверху. Нарисуем, стрелки для отражений от передней и от задней поверхностей и сложим их — скажем, у нас получится результирующая стрелка длиной 0,3, указывающая на 5 часов.

Каким образом соединить обе стрелки, чтобы нарисовать амплитуду всего события в целом? Посмотрим на каждую стрелку по-новому: как на инструкцию, указывающую, во сколько раз *сжимать* и на какой угол *поворачивать*.

В нашем примере первая амплитуда имеет длину 0,2 и повернута к 2 часам. Если мы начнем с «единичной стрелки» — стрелки длиной 1, направленной строго вверх,— мы должны *сжать* эту единичную стрелку от 1 до 0,2 и *повернуть* ее с 12 часов на 2 часа. Амплитуду второго этапа можно рассматривать как сжатие единичной стрелки от 1 до 0,3 и поворот с 12 часов на 5 часов.

Далее, чтобы соединить амплитуды обоих этапов, будем сжимать и поворачивать стрелки *по очереди*. Прежде всего сожмем единичную стрелку от 1 до 0,2 и повернем ее с 12 часов на 2 часа; затем мы сожмем стрелку еще сильней, от

0,2 до трех десятых этой величины, и повернем ее на 5 часов, т.е. мы повернем ее с 2 часов до 7 часов. В результате получится стрелка длиной 0,06, направленная на 7 часов. Она представляет вероятность, равную 0,06 в квадрате, т. е. 0,0036.

Внимательно рассмотрев стрелки, мы видим, что последовательное сжатие и вращение стрелок дает такой же результат, как сложение их углов (2 часа + 5 часов) и умножение их длин (0,2 • 0,3). Понять, почему мы складываем углы, просто: направление стрелки определяется поворотом воображаемой стрелки часов. Поэтому суммарный поворот для двух последовательных этапов просто равен сумме поворота на первом этапе и дополнительного поворота на втором этапе.

Вопрос о том, почему мы называем этот процесс «умножением стрелок», требует несколько более подробного объяснения, но это интересно. Давайте взглянем на умножение

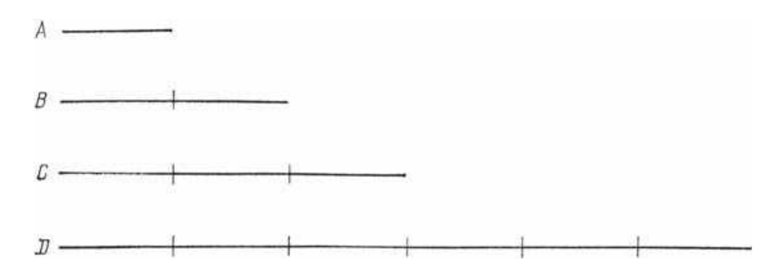


Рис. 38. Любое число может быть выражено в виде преобразования единичного отрезка посредством растяжения или сжатия. Если *A* — это 1, то *B* представляет собой 2 (растяжение), а *C* — 3 (растяжение). Умножение отрезков выполняется путем последовательных преобразований. Например, что значит умножить 3 на 2? Единичный отрезок растягивается в 3 раза, а затем еще в 2 раза, результат — растяжение в 6 раз (отрезок *D*). Если *D* — единичный отрезок, то отрезок *C* представляет собой $^1/_2$ (сжатие), а отрезок *B* — $^1/_3$ (сжатие), и умножение $^1/_2$ на $^1/_3$ означает, что единичный отрезок *D* сжат до $^1/_2$, а затем до $^1/_3$ от этого, давая ответ — сжатие до $^1/_6$

с точки зрения древних греков (это не имеет никакого отношения к лекции). Греки хотели пользоваться не только целыми числами, поэтому они изображали числа отрезками. Любое число можно представить в виде *преобразования* единичного отрезка — растягивая или сжимая его. Например, если отрезок *A* представляет собой единицу (см. рис. 38), то отрезок *B* представляет собой 2, а отрезок *C* — 3.

Теперь, как умножить 2 на 3? Мы проводим преобразования *последовательно:* взяв отрезок *A* в качестве единицы,

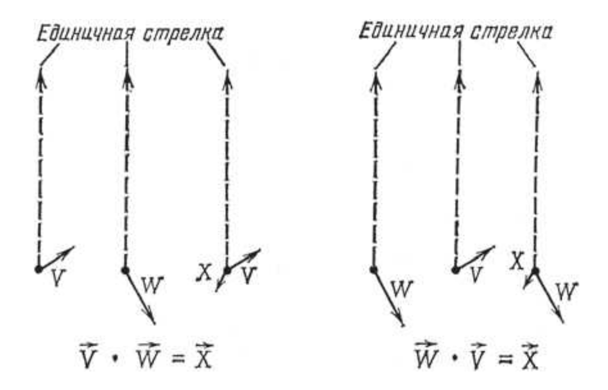


Рис. 39. Математики установили, что умножение стрелок может быть также выражено при помощи последовательных преобразований (в нашем случае — сжатия и поворота) единичной стрелки. Как и при обычном умножении от перемены мест сомножителей произведение не меняется. Чтобы получить ответ — стрелку *X,* вы можете умножать стрелку *V* на стрелку *W* или стрелку *W* на стрелку *V*

мы удлиняем его в два раза, а затем еще в три раза (или в три раза, а затем еще в два раза — порядок умножения не имеет никакого значения). В результате получается отрезок *D,* длина которого представляет 6. А как умножить $^1/_2$ на $^1/_3$? Взяв в качестве единицы отрезок *D,* сожмем его до $^1/_2$, а затем до $^1/_3$ от этого. В результате получится отрезок *A,* представляющий $^1/_6$.

Умножение стрелок устроено по этому же принципу (см. рис. 39). Мы последовательно проводим преобразование единичной стрелки — только преобразование *стрелки* включает теперь *две* операции — сжатие и поворот. Чтобы умножить стрелку *W* на стрелку *V,* мы сжимаем и поворачиваем стрелку настолько, насколько требует стрелка *V,* а затем настолько, насколько требует стрелка *W* — порядок опять не имеет никакого значения. Таким образом, умножение стрелок подчиняется тому же правилу последовательных преобразований, что и умножение обычных чисел*.

---

* Математики старались найти все возможные объекты, подчиняющиеся алгебраическим правилам ($A+B=B+A$, $A \cdot B = B \cdot A$ и т.п.). Первоначально правила были выработаны для положительных целых чисел, которыми пользовались, чтобы считать, например яблоки или людей. Числа совершенствовались: придумали нуль, дроби, иррациональные числа, т.е. числа, которые нельзя представить как частное от деления двух целых чисел, отрицательные числа — и все они по-прежнему подчинялись тем же алгебраическим правилам. Некоторые введенные математиками числа сначала представляли для людей трудности — трудно было представить себе половину человека — но сегодня в этом нет ничего сложного. Никто не представляет себе кровопролития и не испытывает моральных неудобств, услышав, что где-то на квадратную милю приходится в среднем 3,2 человека. Никто не пытается представить себе 0,2 человека; люди понимают, что означают эти 3,2: если умножить 3,2 на 10, получится 32. Таким образом, некоторые, удовлетворяющие математическим законам явления представляют интерес для математиков, даже если они не всегда соответствуют реальной ситуации. Стрелки на плоскости можно «складывать», приставляя голову одной к хвосту другой, или «умножать» при помощи последовательных поворотов и сжатий. Так как эти стрелки подчиняются тем же алгебраическим правилам, что и обычные числа, математики называют их числами. Но чтобы отличать их от обычных чисел, их называют «комплексными числами». Для тех из вас, кто дошел в изучении математики до комплексных чисел, я мог бы сказать: «Вероятность события — это квадрат модуля комплексного числа.

Вернемся к первому эксперименту из первой лекции — частичному отражению света от единственной поверхности — имея в виду последовательность этапов (см. рис. 40). Мы можем разделить путь отражения на три этапа: 1) свет летит от источника к стеклу; 2) свет отражается от стекла; 3) свет летит от стекла к детектору. Каждый шаг можно рассматривать как сжатие и поворот единичной стрелки на определенную величину.

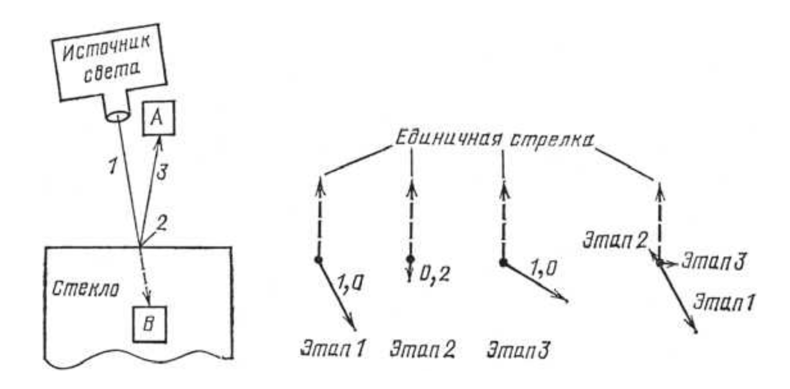


Рис. 40. Отражение от единственной поверхности можно разделить на три этапа, каждый со сжатием и/или поворотом единичной стрелки. Конечный результат — стрелка длиной 0,2, определенным образом направленная,— такой же, как и прежде, но наш метод анализа стал более подробным

Вы помните, что в первой лекции мы не рассматривали *все* пути, которыми свет мог отразиться от стекла. Нам пришлось бы рисовать и складывать великое множество малень-

---

Если событие может произойти несколькими взаимоисключающими способами, вы складываете комплексные числа; если оно может произойти только в результате последовательных этапов, вы умножаете комплексные числа». Хотя эта формулировка может звучать более внушительно, я не сказал ничего нового — я просто использовал другие выражения.

ких стрелочек. Чтобы избежать всех этих подробностей, я создал у вас впечатление, что свет попадает в определенную точку на поверхности стекла, — что он не расходится. На самом же деле по пути из одной точки к другой свет расходится (если только на его пути не встанет линза), и с этим связано некоторое сжатие единичной стрелки.

И пока я хотел бы продолжать придерживаться этого упрощенного взгляда, предполагающего, что свет *не* расходится. Поэтому мы можем пренебречь сжатием. Можно также предположить, что так как свет не расходится, каждый фотон, вылетевший из источника, завершит свой путь в *A* или в *B*.

Итак: на первом этапе отсутствует сжатие, но есть поворот единичной стрелки — он соответствует величине поворота воображаемой часовой стрелки за время движения фотона от источника до передней поверхности стекла. В нашем примере первому этапу соответствует стрелка единичной длины, направленная под некоторым углом,— допустим, указывающая на 5 часов.

Второй этап — это отражение фотона от стекла. Здесь имеется заметное сжатие единичной стрелки — от 1 до 0,2 — и половина полного оборота: поворот на 6 часов. (Эти числа кажутся сейчас произвольными: они зависят от того, отражается ли свет от стекла или другого какого-нибудь вещества. В третьей лекции я их тоже объясню!) Таким образом, второму этапу соответствует амплитуда длиной 0,2, направленная на 6 часов (полуоборот).

Последний этап — это движение фотона от стекла к детектору. Здесь так же, как и на первом этапе, сжатие отсутствует, но есть поворот единичной стрелки — допустим, расстояние немного меньше, чем на первом этапе, и стрелка указывает на 4 часа.

Теперь «умножим» последовательно стрелки *1, 2* и *3* (сложим углы и перемножим длины). Конечный результат трех

этапов — 1) поворота, 2) сжатия и полуоборота и 3) поворота — такой же, как и в первой лекции: суммарный поворот на первом и третьем этапах (5 часов + 4 часа) равен полученному нами в результате непрерывного движения часовой стрелки (9 часов); добавочный полуоборот второго этапа приводит к тому, что стрелка указывает в направлении, обратном часовой стрелке, как было и в первой лекции. А сжатие до 0,2 на втором этапе дает стрелку, квадрат которой соответствует 4 %-ному частичному отражению, наблюдавшемуся для единичной поверхности.

В этом эксперименте возникает вопрос, который мы не рассматривали в первой лекции: что происходит с фотонами, летящими в *B* — с теми, что проникли сквозь поверхность стекла? Амплитуда того, что фотон попадет в *B*, должна иметь длину около 0,98, так как 0,98 • 0,98=0,9604, что достаточно близко к 96 %. Эту амплитуду также можно проанализировать, разложив ее на отдельные этапы (см. рис. 41).

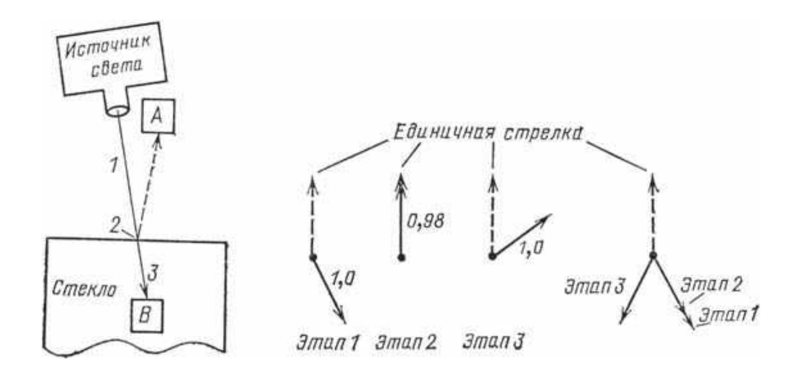


Рис. 41. Прохождение сквозь единственную поверхность также можно разделить на три этапа, со сжатием и/или поворотом на каждом этапе. Квадрат стрелки длиной 0,98 равен примерно 0,96, что дает 96 % вероятности прохождения (в сумме с 4 % вероятности отражения это дает все 100 % света)

Первый этап такой же, как для фотона, летящего в *A*: фотон летит из источника света к стеклу — единичная стрелка повернута на 5 часов.

На втором этапе фотон проходит сквозь поверхность стекла: при этом не происходит никакого поворота, а только небольшое сжатие — до 0,98.

Третий этап — прохождение фотона сквозь внутренний слой стекла — включает добавочный поворот без сжатия.

Конечный результат — это стрелка длиной 0,98, повернутая в некотором направлении, и ее квадрат соответствует вероятности того, что фотон попадет в *B* — 96 %.

Теперь давайте обратимся к частичному отражению от двух поверхностей. Отражение от передней поверхности будет таким же, как от единственной поверхности. Поэтому три этапа отражения от передней поверхности будут такими, как мы только что видели (см. рис. 40).

Отражение от задней поверхности можно разложить на семь этапов (см. рис. 42). Оно включает поворот, равный полному повороту часовой стрелки за время движения фотона по всему пути (этапы *1, 3, 5* и 7), сжатие до 0,2 (этап *4*) и два сжатия до 0,98 (этапы *2* и *6*). Результирующая стрелка указывает в том же направлении, что и прежде, но ее длина равна 0,98 • 0,2 • 0,98=0,192, что я в первой лекции округлил до 0,2.

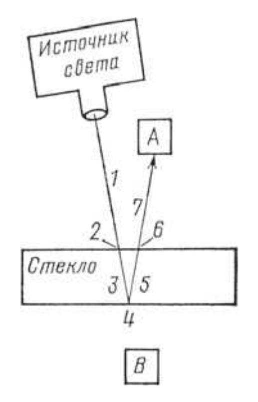


Рис. 42. Отражение от задней поверхности стеклянной пластинки можно разделить на семь этапов. На этапах *1, 3, 5* и *7* происходит только поворот; на этапах *2* и *6* происходит сжатие до 0,98, а на этапе *4* — сжатие до 0,2. В итоге получается стрелка длиной 0,192, которую мы округляем до 0,2 (см. первую лекцию), повернутая на угол, равный полному повороту воображаемой часовой стрелки

Подводя итоги, сформулируем правила для отражения света от стекла и для прохождения света через стекло: 1) отражение из воздуха в воздух (от передней поверхности) сопряжено со сжатием до 0,2 и полуоборотом; 2) отражение от стекла в стекло (от внутренней поверхности) также включает сжатие до 0,2, но без поворота; 3) переход из воздуха в стекло или из стекла в воздух включает сжатие до 0,98 без поворота.

Вероятно, это уж слишком, но я не могу устоять перед искушением привести вам еще один интересный пример того, как ведет себя свет и как можно проанализировать его поведение, пользуясь правилами последовательных этапов. Поместим детектор под стеклом и рассмотрим вопрос, о котором мы не говорили в первой лекции,— о вероятности *прохождения* света через две поверхности стекла (см. рис. 43).

Вы, конечно, знаете ответ: вероятность того, что фотон попадет в *B,* равна просто 100 % за вычетом найденной раньше вероятности, что фотон попадет в *A*. Так, если мы полу-

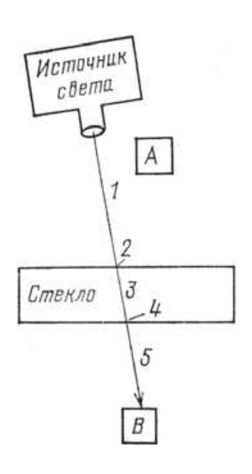


Рис. 43. Прохождение через две поверхности можно разделить на пять этапов. На этапе *2* единичная стрелка сжимается до 0,98, на этапе *4* стрелка длиной 0,98 сжимается еще раз до 0,98 (что дает примерно 0,96). На этапах *1, 3* и *5* происходит только поворот. В итоге квадрат стрелки длиной 0,96 будет равен примерно 0,92, что дает вероятность прохождения через две поверхности, равную 92 %. (Это соответствует 8 %-ному отражению, правильному лишь «дважды в сутки».) Когда толщина пластинки такова, что вероятность отражения равна 16 %, то в сумме с 92 % вероятности прохождения получается 108 %, т.е. мы учли 108 % света.

В нашем анализе что-то неправильно!

чили, что вероятность попасть в *A* равна 7 %, то вероятность попасть в *B* равна 93 %. А так как вероятность для *A* меняется от 0 через 8 % до 16 % (для разных толщин стекла), то вероятность для *B* меняется от 100 % через 92 % до 84 %.

Это правильный ответ, но мы ожидаем, что *все* вероятности можно вычислять, возведя в квадрат результирующую стрелку. Как вычислить амплитуду пропускания света стеклянной пластинкой? И как ей удается таким именно образом менять свою длину, чтобы всегда соответствовать длине амплитуды *A*, так что вероятность для *A* и вероятность для *B* в сумме всегда дают 100 %? Давайте рассмотрим вопрос несколько подробнее.

Движение фотона от источника к детектору, находящемуся под стеклом, состоит из пяти этапов. Давайте сжимать и поворачивать единичную стрелку по мере продвижения.

Первые три этапа будут такими же, как в предыдущем примере: фотон летит из источника к стеклу (поворот, сжатия нет), фотон проходит сквозь переднюю поверхность (поворота нет, сжатие до 0,98); фотон проходит стекло (поворот, сжатия нет).

Четвертый этап — когда фотон проходит сквозь заднюю поверхность стекла — ничем не отличается от второго этапа в том, что касается поворотов и сжатия: поворота нет, а сжатие до 0,98 от 0,98, т.е. длина стрелки становится 0,96.

Наконец, пятый этап — фотон опять летит по воздуху в детектор — это значит, что происходит еще поворот, но без дальнейшего сжатия. В результате получаем стрелку длиной 0,96, указывающую в некотором направлении, заданном последовательными поворотами часовой стрелки.

Стрелка длиной 0,96 соответствует вероятности около 0,92 (0,96 в квадрате), а это значит, что в среднем 92 фотона из каждых 100, вылетевших из источника, попадают в *B*. Это также значит, что 8 % фотонов отражаются от обеих поверхностей и попадают в *A*. Но в первой лекции мы обнаружили,

что 8 %-ное отражение от двух поверхностей бывает крайне редко («дважды в сутки») — что в действительности отражение от двух поверхностей флуктуирует периодически от нуля до 16 %, по мере постепенного утолщения слоя стекла. Что происходит, когда стекло имеет как раз такую толщину, чтобы частичное отражение составило 16 %? Из каждых 100 фотонов, вылетевших из источника, 16 попадают в *A,* а 92 — в *B,* что дает в сумме 108 % света — ужасно! Что-то неправильно.

Мы пренебрегли рассмотрением *всех* путей, по которым свет мог попасть в *B*! Например, он мог отразиться от задней поверхности и подняться сквозь стекло наверх, как будто бы

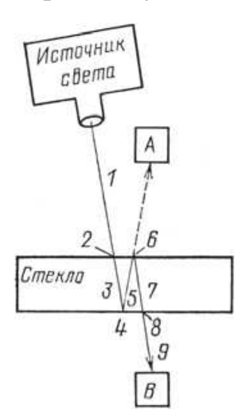


Рис. 44. Чтобы вычисление было более точным, надо рассмотреть и другой возможный способ прохождения света через две поверхности. Этот способ включает два сжатия до 0,98 (этапы *2* и *8*) и два сжатия до 0,2 (этапы *4* и *6*), в результате чего получается стрелка длиной 0,0384 (округляем до 0,04)

направляясь в *A*, но затем отразиться от передней поверхности и опять попасть в *B* (см. рис. 44). Эта траектория состоит из девяти этапов. Посмотрим, что последовательно происходит с единичной стрелкой в то время, как свет проходит каждый этап (не беспокойтесь, это только сжатия и повороты!).

Первый этап — фотон летит по воздуху (поворот, сжатия нет). Второй этап — фотон проникает в стекло (поворота нет, сжатие до 0,98). Третий этап — фотон летит в стекле (поворот, сжатия нет). Четвертый этап — отражение от задней поверхности (поворота нет, сжатие до 0,2 от 0,98, т.е. до 0,196). Пятый

этап — фотон в стекле возвращается наверх (поворот, сжатия нет). Шестой этап — фотон отскакивает от передней поверхности (это на самом деле «задняя» поверхность, так как фотон остается *внутри* стекла) (поворота нет, но сжатие до 0,2 от 0,196, т. е. до 0,0392). Седьмой этап — фотон возвращается вниз по стеклу (еще поворот, сжатия нет). Восьмой этап — фотон проходит сквозь заднюю поверхность (поворота нет, а сжатие до 0,98 от 0,0392, т. е. до 0,0384). Наконец, девятый этап — фотон проходит по воздуху в детектор (поворот, сжатия нет).

В результате всех этих сжатий и поворотов получаем амплитуду длиной 0,0384 — для всех практических вычислений можно считать ее примерно равной 0,04 — и повернутую на угол, соответствующий полному повороту часовой стрелки за время движения фотона по этой более длинной траектории. Эта стрелка соответствует *второму* пути, по которому свет может попасть из источника в *B*. Теперь у нас имеются два альтернативных варианта, поэтому, чтобы провести результирующую стрелку, мы должны *сложить* две стрелки — стрелку для более короткого пути, длиной 0,96, и стрелку для более длинного пути, длиной 0,04.

Обычно две стрелки направлены по-разному, потому что изменение толщины стекла влечет за собой изменение направления стрелки длиной 0,04 относительно стрелки длиной 0,96. Но посмотрите, как хорошо все получается: дополнительные обороты, сделанные часовой стрелкой во время движения фотона на этапах *3* и *5* (по пути к *A*), в точности равны дополнительным оборотам, сделанным за время движения фотона на этапах *5* и *7* (по пути в *B*). Это значит, что когда стрелки отражения взаимно уничтожаются, давая результирующую стрелку, соответствующую нулевому отражению, стрелки пропускания света усиливают друг друга, давая результирующую длиной 0,96+0,04, или 1. То есть, когда вероятность отражения равна нулю, вероятность пропускания света равна 100 % (см. рис. 45). А когда стрелки отражения

усиливают друг друга, давая амплитуду 0,04, стрелки пропускания света направлены противоположно, что дает амплитуду длиной 0,96—0,04, или 0,92. Следовательно, когда отражение должно быть равно 16 %, пропускание света должно

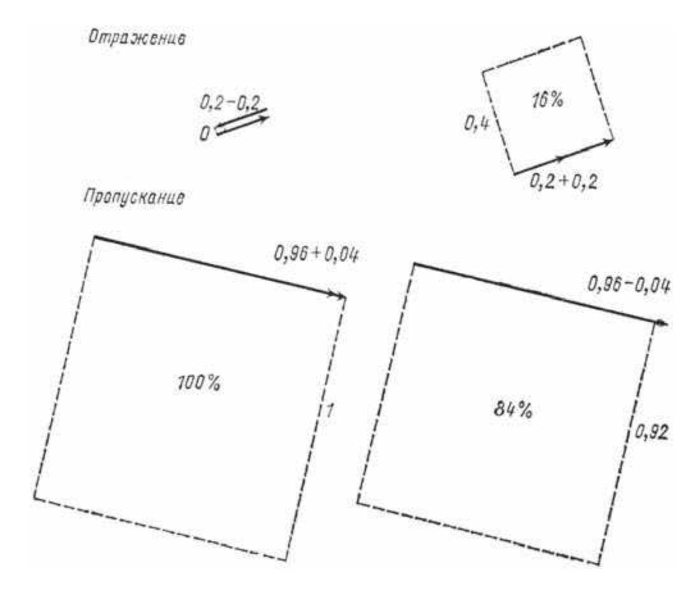


Рис. 45. Природа всегда следит за тем, чтобы были учтены все 100 % света. Когда толщина такова, что одинаково направлены стрелки пропускания, стрелки отражения противоположны друг другу; когда одинаково направлены стрелки отражения, стрелки пропускания противоположны друг другу

быть равно 84 % (0,92 в квадрате). Видите, как умно придумала Природа свои правила — они гарантируют нам, что мы всегда получим все 100 % учитываемых фотонов!*

---

* Заметьте, что мы округлили 0,0384 до 0,04 и взяли 84 % в качестве 0,92 в квадрате, чтобы получить все 100 % света. Но если складывать *всё,* то незачем будет округлять 0,0384 и 84 % — все мельчайшие кусочки стрелок (представляющие все возможные пути

В заключение, прежде чем уйти, я хочу сообщить вам, что имеется дополнение к правилу о том, когда надо умножать стрелки: стрелки надо умножать не только, если событие состоит из последовательных этапов, но и если событие состоит из некоторого числа параллельных — независимых и, возможно, одновременных — явлений. Например, предположим, у нас есть два источника, *X* и *Y*, и два детектора, *A* и

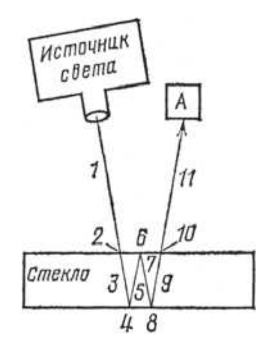


Рис. 46. Для более точных вычислений следует рассмотреть и другие возможные способы отражения света. На этом рисунке сжатия до 0,98 происходят на этапах *2* и *10;* сжатия до 0,2 — на этапах *4, 6* и *8.* В результате получается стрелка длиной примерно 0,008, которая соответствует еще одному возможному варианту отражения и которую поэтому надо сложить с другими отвечающими отражению стрелками (0,2 для передней и 0,192 для задней поверхности)

B (см. рис. 47), и мы хотим вычислить вероятность следующего события: после того как *X* и *Y* теряют по одному фотону, *A* и *B* приобретают по одному фотону. В этом примере фотоны летят в пространстве, чтобы попасть в детекторы — здесь нет ни отражения, ни пропускания — так что мне пред-

---

движения света) компенсируются и дают правильный ответ. Для тех из вас, кто любит такие вещи, привожу пример еще одного пути, по которому свет мог идти из источника в детектор *A* — последовательность трех отражений (и двух пропусканий), результатом чего является суммарная стрелка длиной 0,98 • 0,2 • 0,2 • 0,2 • 0,98 или примерно 0,008 — очень маленькая стрелка (см. рис. 46). Чтобы полностью рассчитать частичное отражение от двух поверхностей, вам придется учесть и эту маленькую стрелку, и еще меньшую, представляющую пять отражений, и так далее.

ставляется удобный случай перестать, наконец, игнорировать тот факт, что свет расходится по мере распространения. Теперь представляю вам *законченное правило* для монохроматического света, распространяющегося в пространстве от одной точки до другой,— здесь нет никаких приближений и

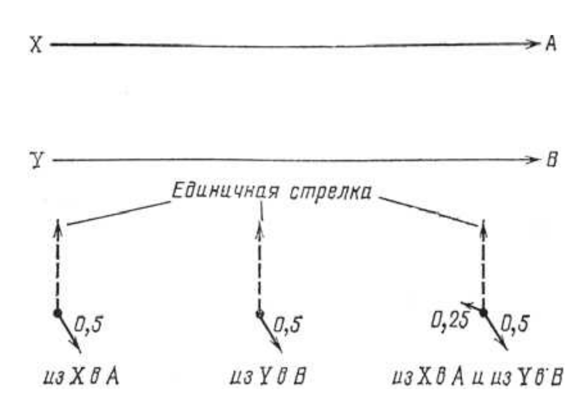


Рис. 47. Если один из способов, которым может произойти данное событие, зависит от некоторого количества независимых процессов, амплитуда этого способа вычисляется путем умножения стрелок для независимых процессов. В данном случае конечное событие таково: после того как источники *X* и *Y* каждый излучили по фотону, фотоумножители *A* и *B* издали по щелчку. Первый способ, каким могло произойти это событие, состоит в том, что фотон из *X* мог попасть в *A*, а фотон из *Y* — в *B* (два независимых события). Чтобы вычислить вероятность этого «первого способа», надо умножить стрелки для каждого независимого события *X—A* и *Y—B,* получив таким образом амплитуду именно этого способа. (Продолжение анализа на рис. 48)

упрощений. Это все, что надо знать о монохроматическом свете, распространяющемся в пространстве (не считая поляризации): *направление* стрелки зависит от воображаемой часовой стрелки, делающей определенное количество оборотов на каждый дюйм пройденного пути (в зависимости от

цвета фотона); *длина* стрелки обратно пропорциональна расстоянию, пройденному светом,— другими словами, стрелка сжимается по мере распространения света*.

Предположим, стрелка *X—A* имеет длину 0,5 и указывает на 5 часов так же, как и стрелка *Y—B* (см. рис. 47). Перемножив стрелки, получаем результирующую стрелку длиной 0,25 и направленную на 10 часов.

Но постойте! Это событие могло произойти другим способом: фотон из *X* мог отправиться в *B,* а фотон из *Y* — в *A.* Каждый из этих подпроцессов имеет свою амплитуду: надо также нарисовать и эти стрелки и перемножить их, чтобы получить амплитуду такого именно способа осуществления события (см. рис. 48). Так как величина сжатия, связанного с расстоянием, очень мала по сравнению с величиной поворота, стрелки *X—B* и *Y—A* имеют, по существу, такую же длину 0,5, как и стрелки *X—A* и *Y—B,* но направлены они будут совершенно по-другому: часовая стрелка делает 36 000 оборотов на один дюйм пробега красного света, поэтому даже маленькое изменение расстояния вызывает значительное изменение показаний стрелки.

Амплитуды для каждого способа, которым могло бы произойти событие, складываются и дают результирующую стрелку. Так как длины стрелок, по существу, одинаковы, имеется возможность того, что стрелки окажутся противоположно направленными и взаимно сократятся. Относительные направления двух стрелок можно менять, изменяя расстояние между источниками или детекторами: просто сдвигая или раздвигая детекторы, можно усилить или совсем

---

* Это правило соответствует тому, чему учат в школе: количество света, распространяющегося на какое-то расстояние, обратно пропорционально квадрату расстояния — потому что квадрат стрелки, сжавшейся наполовину, равен одной четверти исходного квадрата.

уничтожить вероятность события, точно так же, как в случае частичного отражения от двух поверхностей*.

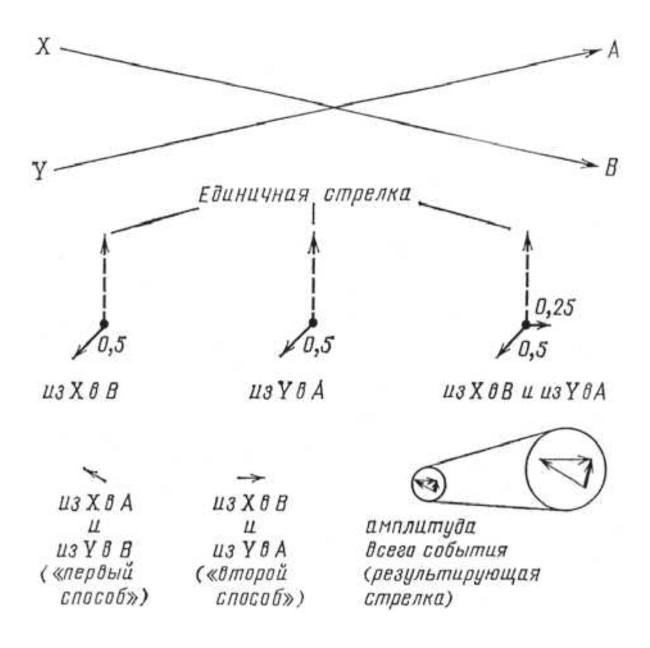


Рис. 48. Событие, обсуждаемое в подписи к рис. 47, могло бы происходить другим способом — фотоны летят из *X* в *B* и из *Y* в *A*. В этом случае все событие также зависело бы от двух независимых процессов, так что амплитуда этого «второго способа» вычисляется также путем умножения стрелок для независимых событий. Стрелки для «первого» и «второго» способов в конце концов складываются, давая результирующую стрелку всего события. Вероятность события всегда представляется *единственной результирующей стрелкой* — независимо от того, сколько стрелок было нарисовано, сложено и умножено, чтобы ее получить

* Это явление, получившее название «эффект Ханбэри — Брауна — Твисса», используют, чтобы различать единичные и двойные источники радиоволн в далеком космосе, даже если составляющие двойного источника находятся очень близко друг к другу.

В этом примере стрелки умножались, а затем складывались, и в итоге получалась результирующая стрелка (амплитуда события), квадрат длины которой равен вероятности события. Надо подчеркнуть, что независимо от того, сколько стрелок мы рисуем, складываем или умножаем, наша цель — получить *единственную результирующую стрелку всего события*. Студенты-физики поначалу часто совершают ошибки, так как упускают из виду этот важный момент. Они так долго трудятся над анализом событий, в которых участвует единственный фотон, что начинают считать, будто стрелка как-то связана с самим фотоном. Но эти стрелки представляют собой амплитуды вероятности, дающие при возведении их в квадрат *вероятность* всего события целиком*.

В следующей лекции я начну упрощать и объяснять свойства вещества: покажу, откуда берется сжатие до 0,2, почему кажется, что свет проходит сквозь стекло или воду медленнее, чем сквозь воздух, и т. д. Ведь до сих пор я жульничал. На самом деле фотоны не отскакивают от поверхности стекла; они взаимодействуют с электронами *внутри* стекла. Я покажу вам, что фотоны в действительности только переходят от одного электрона к другому, и отражение и пропускание являются результатом того, что электрон захватывает фотон, потом, так сказать, «чешет в затылке» и испускает *новый* фотон. Это упрощение всего, о чем мы до сих пор говорили, очень приятно.

---

* Надо помнить об этом принципе, чтобы не прийти в замешательство, столкнувшись с «редукцией волнового пакета» и тому подобной магией.

Лекция 3

ЭЛЕКТРОНЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Это третья из четырех лекций, посвященных весьма трудному предмету — квантовой электродинамике. И так как сегодня слушателей явно больше, чем было раньше, то, значит, многие из вас не слышали первых двух лекций. Им эта лекция покажется почти полностью непонятной. Те же, кто *слышал* первые две лекции, также сочтут эту лекцию непонятной, но они знают, что так и должно быть: я уже объяснял на первой лекции, что мы вынуждены описывать поведение Природы, как правило, непонятным образом.

В этих лекциях я хочу рассказать о наиболее изученном разделе физики — взаимодействии электронов со светом. Большая часть знакомых вам явлений основана на взаимодействии электронов со светом — например, вся химия и биология. Эта теория не охватывает только гравитационные и ядерные явления; все остальное в ней содержится.

На первой лекции мы обнаружили, что у нас нет наглядного механизма для описания даже такого простейшего явления, как частичное отражение света от стекла. Кроме того, мы не можем предсказать, отразится ли данный фотон, или пройдет сквозь стекло. Все, что мы можем сделать — посчитать *вероятность* конкретного события — отражения света в

данном случае. (Она равна примерно 4 %, когда свет прямо падает на одиночную поверхность стекла; при наклонном падении вероятность отражения возрастает.)

Если мы имеем дело с вероятностями в *обычных* условиях, выполняются следующие «правила соединения»: 1) если событие может произойти *взаимоисключающими способами,* мы *складываем* вероятности всех различных способов; 2) если событие происходит *поэтапно* или в результате ряда независимых событий, мы *перемножаем* вероятности всех этапов (или событий).

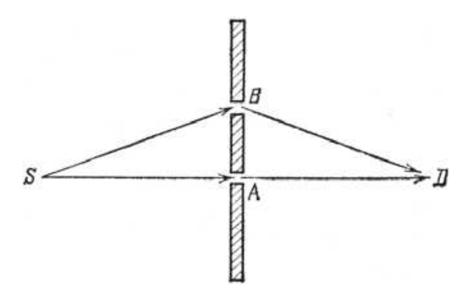


Рис. 49. Через каждое из двух маленьких отверстий (в точках *A* и *B* экрана, расположенного между источником *S* и детектором *O*, в случае, если открыто только одно) проходит примерно одинаковое количество света (в данном случае 1 %). Когда открыты оба отверстия, происходит «интерференция». Детектор щелкает от 0 до 4 % случаев в зависимости от расстояния между *A* и *B* (см. рис. 51, *a*)

В фантастическом и удивительном мире квантовой физики вероятности вычисляются как *квадраты длин стрелок*. Там, где в обычных условиях мы сложили бы вероятности, мы неожиданно для себя «складываем» *стрелки;* там, где умножили бы вероятности — «перемножаем» *стрелки*. Необычные ответы, получаемые при вычислении вероятностей таким способом, прекрасно соответствуют результатам эксперимента. Мне как раз очень нравится, что мы должны

прибегать к таким необычным правилам и странным рассуждениям, чтобы понять Природу, и я всегда с удовольствием рассказываю об этом. За этим анализом Природы нет никакого скрытого механизма, «колесиков и шестеренок». Если вы хотите понять Ее, вы должны принять это.

Прежде чем перейти к основной части этой лекции, хочу показать вам еще один пример поведения света. Я расскажу об очень слабом свете одного цвета, который распространяется из источника 5 в детектор *D* (см. рис. 49) в виде одиночных фотонов. Поместим экран между источником и детектором и проделаем в нем два очень маленьких отверстия в точках *A* и *B,* находящихся на расстоянии в несколько миллиметров друг от друга. (Если расстояние между источником и детектором 100 сантиметров, размер дырочек должен быть меньше, чем десятая доля миллиметра.) Пусть точка *A* лежит на одной прямой с точками *S* и *D*, а точка *B* — несколько в стороне от *A*, не на этой прямой.

Закрыв отверстие в *B,* получим в *D* некоторое количество щелчков, представляющих фотоны, прошедшие через *A* (скажем, детектор щелкает в среднем один раз на каждые 100 фотонов, испускаемых источником *S,* т.е. в 1 % случаев). Мы знаем из второй лекции, что если закрыть отверстие в *A* и открыть отверстие в *B,* получится примерно такое же, в среднем, количество щелчков — так как отверстия очень маленькие. (Когда мы слишком «сжимаем» свет, правила обычного мира — например, что свет распространяется прямолинейно — нарушаются.) Когда мы открываем оба отверстия, то получается сложный результат, связанный с наличием интерференции. При некотором расстоянии между отверстиями мы получаем щелчков больше, чем ожидаемые 2 % (вплоть до ~ 4 %); а чуть изменив это расстояние, вообще не получаем щелчков.

Естественно было бы ожидать, что открытие дополнительного отверстия *всегда* будет увеличивать количество

света, попадающего в детектор. Но в действительности это не так. Поэтому неправильно говорить, что свет «распространяется или по одному пути, или по другому». Я все еще ловлю себя на том, что говорю: «Он распространяется по этому пути или по тому пути». Однако когда я так говорю, я должен иметь в виду, что подразумевается сложение амплитуд: имеется амплитуда прохождения фотона по одному пути *и* амп-

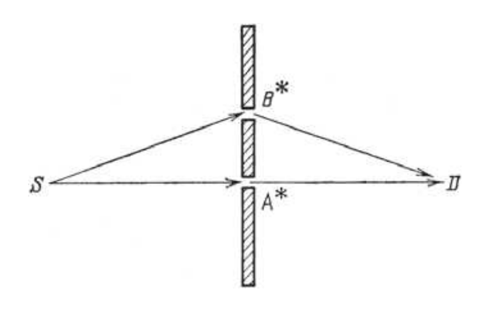


Рис. 50. Если в точках *A* и *B* расположены специальные детекторы (*), показывающие, по какому из путей распространяется свет при двух открытых отверстиях, эксперимент меняется. Поскольку фотон всегда проходит или через одно, или через другое отверстие (в случае, если вы за ними следите), имеются два конечных состояния: 1) сработали детекторы в *A* и *D* и 2) сработали детекторы в *B* и *D*. Вероятность того, что случится каждое из этих событий, равна примерно 1 %. Вероятности двух событий складываются обычным способом, и вероятность срабатывания детектора в *D* оказывается равной 2 % (см. рис. 51, *б*)

литуда прохождения по другому пути. Если амплитуды взаимно гасят друг друга, свет не будет распространяться, если даже, как в данном случае, открыты оба отверстия.

А вот еще одна странная особенность Природы, о которой мне хотелось бы рассказать. Предположим, мы помещаем в точках *A* и *B* специальные детекторы (можно сконструировать детектор, показывающий, прошел ли через него фотон) и

теперь знаем, через какое отверстие (отверстия) проходит фотон, когда оба они открыты (см. рис. 50). Раз вероятность того, что одиночный фотон попадет из *S* в *D,* зависит только от расстояния между отверстиями, то, видимо, фотон как-то незаметно разделяется на два, а потом снова соединяется, не так ли? В соответствии с такой гипотезой, детекторы в *A* и *B* всегда должны срабатывать одновременно (возможно, вполсилы?), тогда как детектор в *D* должен срабатывать с вероятностью от нуля до 4 % — в зависимости от расстояния между *A* и *B*.

А вот что происходит на самом деле: детекторы в *A* и *B* *никогда* не срабатывают одновременно — срабатывает детектор в *A или* детектор в *B*. Фотон не разделяется на два: он распространяется либо по одному, либо по другому пути.

Более того, в этих условиях детектор в *D* срабатывает в 2 % случаев — а это просто сумма вероятностей прохождения через *A* и через *B* (1 % + 1 %). Значение 2 % не зависит от расстояния между *A* и *B*; интерференция *исчезает,* если в *A* и *B* поместить детекторы!

Природа так все устроила, что мы никогда не сможем понять, как она это делает: если мы ставим приборы, чтобы выяснить, по какому пути пойдет свет,— пожалуйста, мы можем это выяснить, но удивительные интерференционные эффекты исчезают. А если у нас нет приборов, показывающих, по какому пути идет свет, интерференционные эффекты восстанавливаются! В самом деле, очень странно!

Чтобы разобраться в этом парадоксе, позвольте напомнить вам самый важный принцип: для того чтобы правильно вычислить вероятность события, нужно очень внимательно отнестись к *четкому определению законченного (полного) события* — в частности, определить, каковы начальные и конечные условия эксперимента. Вы смотрите на оборудование до и после эксперимента и ищете изменения. Когда мы вычисляли вероятность попадания фотона из *S* в *D* без детек-

торов в *A* и *B*, то событием был просто щелчок детектора в *D*. Если щелчок в *D* был единственным изменением условий, то нельзя было сказать, по какому пути летел фотон, поэтому возникла интерференция.

Поместив детекторы в *A* и *B*, мы изменили задачу. Теперь оказывается, что есть *два* законченных события — две различные совокупности конечных условий: 1) сработали детекторы в *A* и *D*; 2) сработали детекторы в *B* и *D*. Если у эксперимента имеется несколько допустимых конечных условий, надо вычислять вероятность каждого как отдельного законченного события.

Для вычисления амплитуды того, что сработают детекторы в *A* и *D,* мы умножаем стрелки, которые представляют следующие этапы: фотон летит из *S* в *A*; фотон летит из *A* в *D;* детектор в *D* срабатывает. Квадрат длины получившейся стрелки есть вероятность этого события — 1 % — такая, как при закрытом отверстии *B,* так как в обоих случаях этапы одинаковы. Другое законченное событие — срабатывание детекторов в *B* и *D*. Вероятность этого события вычисляется таким же способом, и результат такой же, как раньше — примерно 1 %.

Если нас интересует вероятность срабатывания детектора в *D*, причем все равно, сопровождается оно срабатыванием детектора в *A* или в *B,* то эта вероятность равна простой сумме вероятностей двух событий — 2 %. Вообще, если в системе остается что-то, благодаря чему мы *могли бы* определить путь фотона, мы имеем различные «конечные состояния» (различимые конечные условия), и складываем *вероятности, а* не амплитуды всех конечных состояний*.

---

*Полное описание данного эксперимента очень интересно: если детекторы в *A* и *B* не идеальны и детектируют фотоны только в *части* случаев, имеются *три* различных конечных условия: 1) детекторы в *A* и *D* срабатывают; 2) детекторы в *B* и *D* срабатывают;

Я указал на эти обстоятельства, потому что чем больше вы наблюдаете странное поведение Природы, тем сложнее построить наглядную модель, объясняющую даже простейшие явления. И теоретическая физика отказалась от этого.

На первой лекции мы увидели, как можно разделить событие на взаимоисключающие пути и как можно «сложить» стрелки для каждого пути. На второй лекции мы узнали, как можно разделить путь на последовательные этапы, как можно представить стрелку для каждого этапа в виде преобразования единичной стрелки и как «перемножить» стрелки для каждого этапа путем последовательных сжатий и поворотов. Следовательно, мы знакомы со всеми необходимыми правилами рисования и соединения стрелок (представляющих кусочки событий) для получения результирующей стрелки, квадрат длины которой является вероятностью наблюдаемого реального события.

Естественно поинтересоваться, насколько далеко мы можем зайти в этом дроблении события на все более простые подпроцессы. Каков наименьший возможный кусочек события? Имеется ли конечное число кусочков, из которых можно образовать *любое* явление, связанное со светом и

---

3) только детектор в *D* срабатывает, а детекторы в *A* и *B* не срабатывают (остаются в начальном состоянии). Вероятности первых двух событий вычисляются так, как объяснялось выше (за исключением добавочного этапа — сжатия стрелки пропорционально амплитуде срабатывания детектора в *A* или *B* — поскольку детекторы не идеальны). В случае, когда срабатывает только детектор в *D,* мы не можем различить возможности, и Природа играет с нами, вводя интерференцию. Такой же необычный ответ мы получили бы, совсем не имея детекторов в *A* и *B* (отличие лишь в том, что конечная стрелка сжимается пропорционально амплитуде *не*срабатывания детекторов). Окончательный ответ есть смесь, простая сумма вероятностей всех трех случаев (см. рис. 51). По мере возрастания надежности детекторов интерференция ослабляется.

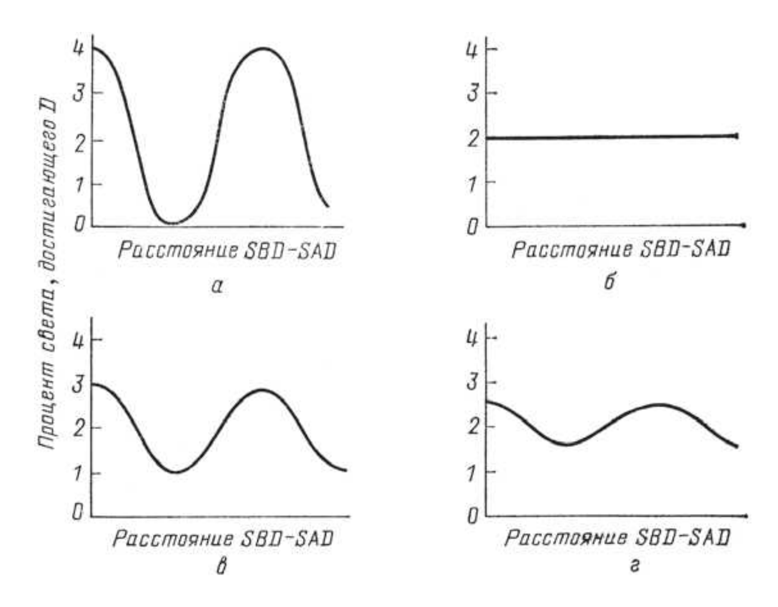


Рис. 51. Если в *A* и *B* нет детекторов, возникает интерференция: доля прошедшего света колеблется от 0 до 4 % (*а*). Если в *A* и *B* имеются детекторы, надежные на 100 %, интерференция не возникает — доля попавшего в *D* света постоянна, 2 % (*б*). Если детекторы в *A* и *B* не надежны на все 100 % (т.е. если *иногда* в *A* и *B* не остается ничего, что можно было бы зарегистрировать), имеются три возможных конечных условия: *A* и *D* сработали, *B* и *D* сработали, только *D* сработал. Окончательная кривая на рисунках обусловлена, следовательно, смесью вкладов всех возможных конечных условий. При уменьшении надежности детекторов в *A* и *B* интерференция усиливается. Так в случае (*в*) детекторы менее надежны, чем в случае (*г*). Принцип, которым надо руководствоваться, встретившись с интерференцией, таков: необходимо независимо вычислить вероятность каждого из различных конечных условий путем сложения стрелок и возведения в квадрат длины результирующей стрелки; после этого вероятности складываются обычным образом

электронами? Имеется ли ограниченное число «букв» в этом языке квантовой электродинамики, комбинируя которые в «слова» и «предложения», можно описать почти каждое явление Природы?

Ответ: да; число равно трем. Существуют только три основных действия, необходимых для получения всех явлений, связанных со светом и электронами.

Прежде чем рассказать вам об этих действиях, мне надо должным образом познакомить вас с действующими лицами. Действующие лица — это фотоны и электроны. Фотоны, частицы света, подробно обсуждались на первых двух лекциях. Электроны были открыты в 1895 г. как частицы: вы могли пересчитать их, вы могли поместить один из них на каплю масла и измерить его электрический заряд. Постепенно стало очевидным, что движение этих частиц объясняет электрические явления в проводах.

Вскоре после открытия электронов стали думать, что атомы подобны маленьким Солнечным системам, состоящим из центральной тяжелой части (названной ядром) и электронов, вращающихся по «орбитам», подобно планетам, вращающимся вокруг Солнца. Если вы считаете, что атомы устроены именно так, вы находитесь в 1910 г.

В 1924 г. Луи де Бройль обнаружил волновые свойства электронов, а вскоре сотрудники лабораторий «Белл» К. Дж. Дэвиссон и Л. Джермер бомбардировали кристалл никеля электронами и показали, что, подобно рентгеновским лучам, электроны отражаются под особыми углами, которые можно вычислить, используя формулу де Бройля для длины волны электрона.

Если рассматривать фотоны на больших расстояниях, много больших, чем требуется для одного оборота стрелки часов, наблюдаемые нами явления довольно точно описываются правилами типа «свет распространяется по прямой». Это происходит потому, что вблизи пути наименьшей дли-

тельности имеется достаточно путей, чтобы усилить друг друга, и достаточно других путей, чтобы погасить друг друга. Но если пространство, по которому летит фотон, становится слишком маленьким (как в случае малых отверстий в экране), эти правила не выполняются, и мы обнаруживаем, что свет не распространяется по прямой, что два отверстия создают интерференцию, и т. д. То же самое и с электронами: на больших расстояниях они движутся как частицы, по определенным траекториям. Но на малых расстояниях, например внутри атома, места так мало, что не существует основного пути, не существует «орбиты»; электроны могут распространяться по множеству путей, каждый из которых характеризуется некоторой амплитудой. Очень важным становится явление интерференции, и мы вынуждены складывать стрелки, чтобы предсказать, где может находиться электрон.

Весьма интересно отметить, что сначала электроны выглядели как частицы, а их волновые свойства были обнаружены позже. С другой стороны (если не считать Ньютона, ошибочно полагавшего, что свет имеет «корпускулярный» характер), свет сначала всем казался волнами, а свойства его как частицы были открыты позже. В действительности и электроны, и свет ведут себя до некоторой степени как волны, а до некоторой степени как частицы. Чтобы не изобретать новых слов, вроде «волница»*, условимся называть такие объекты «частицами». Но все мы знаем, что они подчиняются тем правилам рисования и соединения стрелок, которые я объяснял. Оказалось, что *все* «частицы» в Природе — кварки, глюоны, нейтрино и т. д. (которые будут обсуждаться в следующей лекции) — ведут себя таким квантово-механическим образом.

---

* У Фейнмана *«wavicle»* — от англ. *wave* (волна) и *particle* (частица). — *Примеч. пер.*

Итак, теперь я представлю вам три основных действия, из которых возникают все явления, связанные со светом и электронами.

— Действие 1: Фотон летит из одного места в другое.

— Действие 2: Электрон летит из одного места в другое.

— Действие 3: Электрон испускает или поглощает фотон.

Каждое из этих действий имеет амплитуду (стрелку), которая может быть вычислена по определенным правилам.

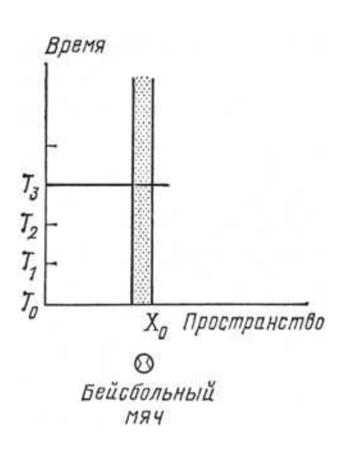


Рис. 52. Сцена, на которой разыгрываются все действия во Вселенной — это пространство-время. Обычно имеющее четыре измерения (три пространственных и одно временное), пространство-время здесь будет представляться двумерным — с одним пространственным (горизонтальная ось) и одним временным (вертикальная ось) измерениями. Когда бы мы ни посмотрели на бейсбольный мяч (например, в момент T_3), он занимает одно и то же место. Так образуется «полоса бейсбольного мяча», растущая со временем вверх

Через несколько минут я сообщу вам эти правила, или законы, при помощи которых можно построить целый мир (как всегда, за исключением атомного ядра и гравитации!).

Сцена, на которой разыгрываются эти действия,— не просто пространство, а пространство и время. До сих пор я не затрагивал проблем, связанных со временем, например, когда именно фотон покинул источник и когда именно достиг детектора. Хотя на самом деле пространство трехмерно, на

графиках, которые я буду рисовать, я сведу его к одномерному: я буду откладывать пространственное положение объекта по горизонтальной оси, а время — по вертикальной.

Первое событие, которое я собираюсь изобразить в пространстве и времени, или в пространстве-времени, как я мог бы его небрежно назвать,— это лежащий неподвижно бейсбольный мяч (см. рис. 52). В четверг утром (этот момент времени я обозначу T_0) мяч находится в некотором месте (которое я обозначу X_0). Поскольку мяч неподвижен, несколько позже, в момент времени T_1, мяч занимает то же место. Несколько позже, в T_2, мяч все еще в X_0. Поэтому диаграмма, изображающая неподвижный мяч — вертикальная

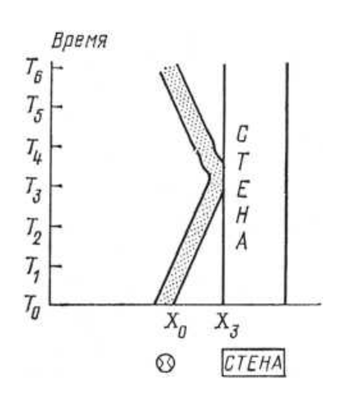


Рис. 53. Бейсбольный мяч, летящий под прямым углом к стенке и затем отскакивающий на первоначальное место (показанное под графиком), движется в одном измерении, а на графике изображается в виде наклонной «полосы мяча». В моменты времени T_1 и T_2 мяч приближается к стенке, в момент T_3 ударяется в нее и начинает обратный путь

полоса, поднимающаяся строго вверх, как бы вся заполненная мячом.

Что произойдет, если мяч движется в невесомости, в космическом пространстве, и летит прямо к стене? Пусть в четверг утром (T_0) он начинает свой путь в X_0 (см. рис. 53). Через некоторое время он оказывается на другом месте, в X_1. Продолжая двигаться, мяч образует наклонную «полосу мяча» на пространственно-временно́й диаграмме. Ударившись о стенку (стоящую неподвижно, и поэтому изображаемую верти-

кальной полосой), мяч движется назад по другой пространственно-временно́й траектории. Точно в то же место (X_0), откуда вылетел, но в другую временную точку (T_6).

Что касается временной шкалы, то удобней откладывать время не в секундах, а в значительно меньших единицах. Поскольку мы будем иметь дело с очень быстро движущимися электронами и фотонами, я хочу, чтобы линия под углом 45° изображала нечто, движущееся со скоростью света. На-

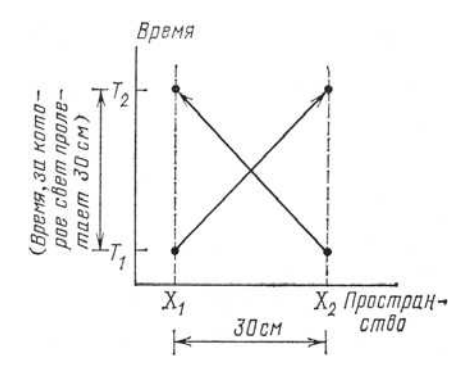


Рис. 54. В этих графиках я буду использовать такую шкалу времени, что частицы, летящие со скоростью света, будут распространяться под углом в 45° в пространстве-времени. Время, которое нужно свету, чтобы пролететь 30 см — из X_1 в X_2 или из X_2 в X_1 — порядка одной миллиардной доли секунды

пример, для частицы, летящей со скоростью света из X_1T_1 в X_2T_2, горизонтальное расстояние между X_1 и X_2 равно вертикальному расстоянию между T_1 и T_2 (см. рис. 54). Масштабный множитель, на который растянута ось времени (чтобы линия под углом 45° изображала частицу, движущуюся со скоростью света), называется *c*, и вы увидите, что эти *c* мельтешат повсюду в формулах Эйнштейна — это следствие неудачного выбора в качестве единицы времени секунды, а не времени, за которое свет пролетает 1 метр.

Теперь давайте подробно рассмотрим первое фундаментальное действие: фотон летит из одного места в другое. Я произвольно изображу это действие волнистой линией, со-

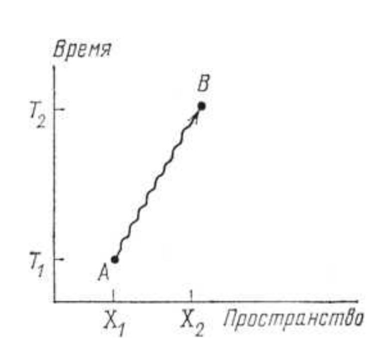


Рис. 55. Фотон (изображенный волнистой линией) с некоторой амплитудой может попасть из одной точки пространства-времени (*A*) в другую точку (*B*). Эта амплитуда, которую я буду называть *P* (*A—B*), вычисляется по формуле, зависящей только от разности пространственных ($X_2—X_1$) и временных ($T_2—T_1$) координат. На самом деле это простая формула: *P*(*A—B*) равна обратной величине разности квадрата этих величин — «интервала» *I*, который можно записать как $(X_2–X_1)^2–(T_2–T_1)^2$

единяющей *A* и *B*. Мне следует быть точнее: надо было бы сказать, что фотон, про который известно, что он находится в данный момент времени в данном месте, имеет некоторую

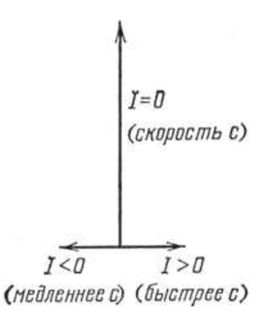


Рис. 56. Если свет распространяется со скоростью *c,* интервал *I*=0 и имеется большой вклад, направленный на 12 часов. Если *I*>0, имеется малый вклад, обратно пропорциональный *I*, направленный на 3 часа. Если *I*<0, имеется аналогичный вклад, направленный на 9 часов. Итак, у света есть амплитуды распространяться быстрее или медленнее скорости *c,* но эти амплитуды взаимно гасятся на больших расстояниях

амплитуду попасть в другое место в другой момент времени. На моем пространственно-временном графике (см. рис. 55) у фотона в точке *A* (с координатами X_1 и T_1) имеется амплитуда попасть в точку *B* (с координатами X_2 и T_2). Величину этой амплитуды я буду называть *P*(*A*—*B*).

Для длины стрелки *P*(*A*—*B*) имеется формула. Эта формула — один из великих законов Природы, и она очень проста. Она зависит от разницы *пространственных* и *временных* координат двух точек. Математически* эта разница может быть выражена как $(X_2—X_1)$ и $(T_2—T_1)$.

Основной вклад в *P*(*A*—*B*), как и следовало ожидать, дает движение с обычной скоростью света — когда $(X_2–X_1)$ равно

---

*В этих лекциях я изображаю пространственное положение точки при помощи одного измерения, вдоль оси *X*. Чтобы определить положение точки в трехмерном пространстве, надо представить себе «комнату» и измерить расстояния от точки до пола и двух примыкающих стен (которые расположены под прямыми углами друг к другу). Эти три расстояния можно обозначить X_1, Y_1 и Z_1. Расстояние от данной точки до другой точки с соответствующими расстояниями X_2, Y_2, Z_2 можно вычислить при помощи «трехмерной теоремы Пифагора»: квадрат расстояния между двумя точками равен

$$(X_2–X_1)^2 + (Y_2–Y_1)^2 + (Z_2–Z_1)^2.$$

Разность этой величины и квадрата временного расстояния,

$$(X_2–X_1)^2 + (Y_2–Y_1)^2 + (Z_2–Z_1)^2 – (T_2–T_1)^2,$$

называют иногда «интервалом» *I*. В соответствии с теорией относительности Эйнштейна, именно от такой комбинации расстояний должна зависеть величина *P*(*A* – *B*). Наибольший вклад в результирующую стрелку *P*(*A* – *B*) набегает именно там, где вы этого ожидаете — где пространственное расстояние равно временному (т.е. где интервал *I* равен нулю). Но кроме того, имеется вклад от не равного нулю *I*, обратно пропорциональный *I* и направленный к 3 часам при *I* положительном (когда свет летит быстрее скорости света) и к 9 часам при *I* отрицательном. Во многих случаях эти последние вклады взаимно гасятся (см. рис. 56).

(T_2—T_1). Но кроме того, имеется амплитуда распространения света быстрее (или медленнее) обычной скорости света. На предыдущей лекции вы узнали, что свет распространяется не только по прямой: теперь вы узнаете, что он распространяется не только со скоростью света!

Вас может удивить то, что имеется амплитуда распространения света со скоростью большей или меньшей скорости света *c*. Эти амплитуды очень малы по сравнению со вкладом от скорости *c*. В действительности такие вклады взаимно гасятся при движении света на большие расстояния. Однако если расстояния малы — как во многих диаграммах, которые я буду рисовать,— другие возможности становятся очень существенными, и их надо учитывать. Итак, вот первое основное действие, первый основной закон физики — фотон летит из одного места в другое. Это объясняет всю оптику; это полная теория света! Правда, не совсем: я не учитывал поляризацию (как всегда) и взаимодействие света с веществом (что приводит меня ко второму закону).

Второе действие, лежащее в основе квантовой электродинамики, таково: электрон летит в пространстве-времени из точки *A* в точку *B*. (Представим на минуту, что этот электрон — упрощенный, фальшивый электрон, не имеющий поляризации,— то, что физики называют электрон «со спином нуль». В действительности у электронов есть своя поляризация, которая, ничего не добавляя к основным идеям, лишь несколько усложняет формулы.) Формула амплитуды этого действия, которую я назову *E*(*A*—*B*), также зависит от (X_2–X_1) и (T_2–T_1) (в той же комбинации, как описано в сноске на с. 103). Кроме того, она зависит от числа, назову его «*n*», которое, будучи однажды определено, позволяет привести все наши расчеты в согласие с экспериментом. (Впоследствии мы увидим, как определить значение *n*.) Это довольно сложная формула, и я, к сожалению, не знаю, как ее просто объяснить. Однако вам может быть интересно узнать, что фор-

мула для $P(A\text{–}B)$ — фотон летит из точки в точку — такая же, как формула для $E(A\text{–}B)$ — электрон летит из точки в точку — если n положить равным нулю*.

Третье основное действие таково: электрон излучает или поглощает фотон (не важно, поглощает или излучает). Я буду называть это действие «соединением», «связью» или «взаимодействием». Чтобы отличать на диаграммах электроны от фотонов, я буду изображать каждый электрон, движущийся в пространстве-времени, прямой линией. Поэтому каждое взаимодействие (связь) представляет собой соединение прямых линий с волнистой линией (см. рис. 58). Амплитуда того, что электрон испустит или поглотит фотон, не выражается какой-либо сложной формулой; она ни от чего не зависит —

---

* Формула для $E(A\text{–}B)$ сложна, но есть интересный способ пояснить, к чему она сводится. Эта величина может быть представлена в виде гигантской суммы по множеству различных путей, которыми электрон может попасть из точки A в точку B в пространстве-времени (см. рис. 57). Электрон может совершить «однопрыжковый перелет» из A прямо в B, «двухпрыжковый перелет» с остановкой в промежуточной точке C, «трехпрыжковый перелет» с остановками в D и E и т. д. При таком рассмотрении амплитуда каждого «прыжка» — из одной точки F в другую точку G — равна $P(F\text{–}G)$, т.е. совпадает с амплитудой попадания фотона из F в G. Амплитуда каждой «остановки» равна n^2, где n — число, о котором я упоминал раньше и которым мы пользуемся, чтобы получить правильный ответ.

Формула для $E(A\text{–}B)$ есть, следовательно, сумма членов $P(A\text{–}B)$ [«однопрыжковый перелет»] $+P(A\text{–}C) \cdot n^2 \cdot P(C\text{–}B)$ [«двухпрыжковый перелет» с остановкой в C] $+P(A\text{–}D) \cdot n^2 \cdot P(D\text{–}E) \cdot n^2 \cdot P(E\text{–}B)$ [«трехпрыжковый перелет» с остановками в D и E] + ... для *всех возможных промежуточных точек C, D, E, ...*

Заметьте, что с увеличением n возрастает вклад непрямых путей в результирующую стрелку. Если n равно нулю (для фотона), все члены с n выпадают (они тоже равны нулю), и остается только первый член, $P(A\text{–}B)$. Итак, $E(A\text{–}B)$ и $P(A\text{–}B)$ тесно связаны.



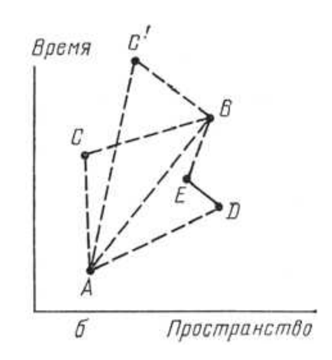
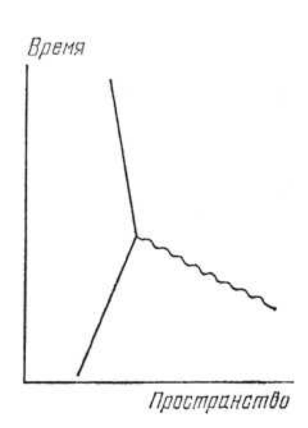


Рис. 57. У электрона имеется амплитуда попасть из одной точки пространства-времени в другую — я буду называть ее *E*(*A*—*B*). Хотя я и буду изображать *E*(*A*—*B*) прямой линией, соединяющей две точки (а), мы можем считать ее суммой многих амплитуд (*б*) — среди которых имеется амплитуда повернуть в точках *C* или C' на «двухпрыжковом» пути, и амплитуда повернуть в точках *D* и *E* на «трехпрыжковом» пути — помимо прямого пути из *A* в *B*. Число поворотов электрона может быть любым, от нуля до бесконечности, а повороты могут произойти в любой точке пространства-времени. И все это учитывается величиной *E*(*A*—*B*)

Рис. 58. У электрона, изображаемого прямой линией, есть некоторая амплитуда излучить или поглотить фотон, изображаемый волнистой линией. Поскольку амплитуды поглощения или излучения одинаковы, я буду называть и то и другое «взаимодействием» или «связью». Амплитуда взаимодействия есть число, которое я назову *j*, оно примерно равно –0,1 (это число иногда называют «зарядом»)



это просто число! Эту константу связи я обозначу *j** — ее значение примерно –0,1; сжатие примерно равно до 0,1 и полуоборот**.

Это все, что касается основных действий,— если не считать небольших усложнений, связанных с поляризацией, которую мы по-прежнему не рассматриваем. Наша следую-

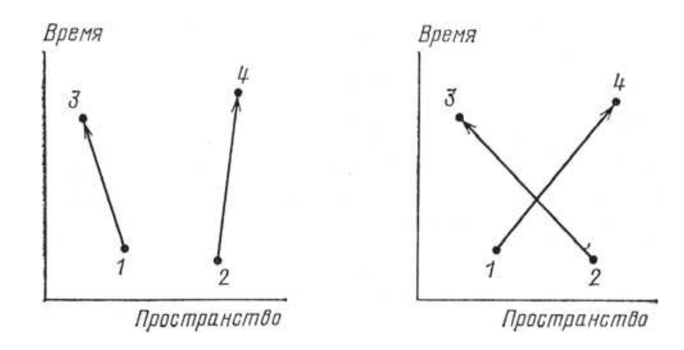


Рис. 59. Чтобы вычислить вероятность того, что электроны попадут из точек *1* и *2* пространства-времени в точки *3* и *4,* вычисляем стрелку «первого пути» (из точки *1* в *3* и из *2* в *4*), используя формулу для *E*(*A*–*B*). Затем вычисляем стрелку «второго пути» — «перекрестного» (из точки *1* в *4* и из *2* в *3*). Складываем стрелки «первого пути» и «второго пути» и получаем хорошее приближение для результирующей стрелки. (Это справедливо для фальшивого, упрощенного электрона «со спином нуль». Если учитывать поляризацию электрона, то надо не складывать, а вычитать стрелки друг из друга)

щая задача: связать между собой эти три действия, чтобы рассматривать несколько более сложные явления.

В качестве первого примера давайте вычислим вероятность того, что два электрона попадут из пространственно-

* Сокращение от junction (соединение). — *Примеч. пер.*

** Это число — амплитуду излучения или поглощения фотона — иногда называют «зарядом» частицы.

временных точек *1* и *2* в точки *3* и *4* (см. рис. 59). Такое событие может произойти несколькими способами. Первый способ состоит в том, что электрон из точки *1* летит в точку *3* (надо подставить *1* и *3* в формулу *E*(*A*—*B*), я запишу это в виде *E*(*1*—*3*), а электрон из точки *2* летит в точку *4*. Поскольку это два независимых подпроцесса, надо умножить одну

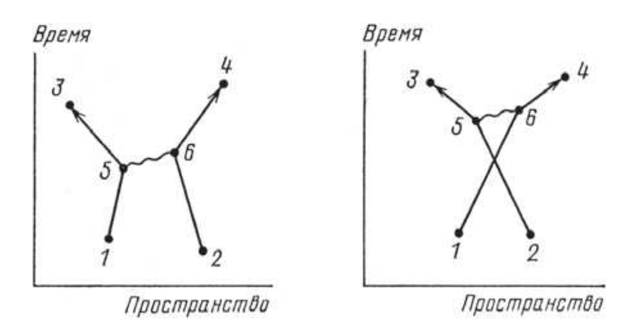


Рис. 60. Вот два других способа, которыми может произойти событие на рис. 59: на каждом рисунке в точке 5 испускается, а в точке *6* поглощается фотон. Конечные условия здесь такие же, как и в двух предыдущих случаях — два электрона входят и два выходят — так что результаты неотличимы. Поэтому стрелки для этих «других способов» надо прибавить к стрелкам для всех способов на рис. 59, тогда получится еще лучшее приближение для результирующей стрелки всего события

стрелку на другую, чтобы получить стрелку для этого первого способа, которым могло произойти событие. Поэтому мы пишем такую формулу для стрелки «первого способа»: *E*(*1*—*3*) • *E*(*2*—*4*).

Другой способ, которым может произойти данное событие,— электрон из точки *1* летит в точку *4*, а электрон из точки *2*— в точку *3*. Это опять два независимых подпроцесса. Стрелка «второго способа» равна *E*(*1*—*4*) • *E*(*2*—*3*), и мы

складываем ее со стрелкой «первого способа»*. Это хорошее приближение для амплитуды данного события.

Чтобы провести более точный расчет, который бы лучше согласовывался с результатами эксперимента, мы должны рассмотреть другие способы, которыми может произойти данное событие. Например, в каждом из двух основных способов один электрон мог отправиться в какое-то новое и чудесное место и испустить фотон (см. рис. 60). Тем временем другой электрон мог попасть в какое-то другое место и поглотить там этот фотон. Вычисление амплитуды первого из этих новых способов заключается в умножении следующих амплитуд: электрон летит из точки *1* в новое и чудесное место *5* (где он излучает фотон), затем летит из *5* в *3*; другой электрон летит из точки *2* в другое место *6* (где он поглощает фотон), затем летит из *6* в *4*. Мы не должны также забывать про амплитуду попадания фотона из *5* и *6*. Я напишу амплитуду такого способа осуществления события в первоклассном математическом виде, а вы можете следить: $E(1–5) \cdot j \cdot E(5–3) \cdot E(2–6) \cdot j \cdot E(6–4) \cdot P(5–6)$ — множество сжатий и поворотов. (Предоставляю вам самим написать формулу для другого случая, когда электрон из точки *1* попадает в точку *4*, а электрон из точки *2* попадет в точку *3*.)**

Но постойте: положение точек *5* и *6* может быть любым в пространстве и времени, не правда ли,— и надо вычислить и сложить стрелки для всех этих положений. Как видите,

---

* Если бы я учитывал поляризацию электрона, стрелку «второго способа» надо было бы «вычесть» — повернуть на 180° и затем прибавить. (Мы еще вернемся к этому позднее.)

** Конечные условия эксперимента для этих более сложных способов такие же, как и для простых: электроны выходят из точек *1* и *2* и попадают в точки *3* и *4*. Так что мы не можем отличить эти взаимоисключающие способы от первых двух. Поэтому мы должны сложить стрелки этих двух способов со стрелками двух способов, рассмотренных нами ранее.

предстоит немало работы. Дело не в том, что правила очень сложны — это похоже на игру в шашки: правила простые, но вы применяете их снова и снова. Итак, наши сложности при расчете связаны с тем, что нужно нагромоздить целую кучу

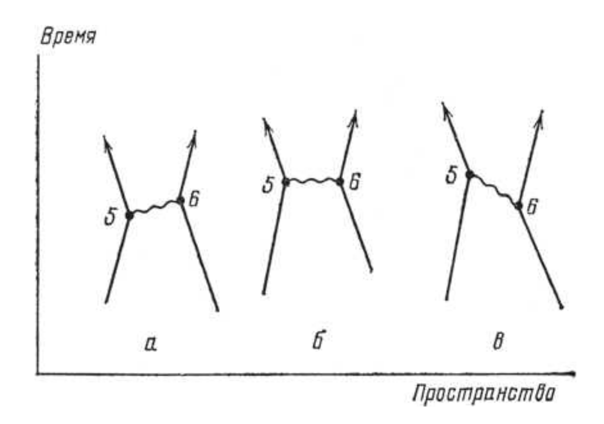


Рис. 61. Поскольку у света имеется амплитуда лететь быстрее или медленнее обычной скорости света, можно считать, что во всех трех примерах фотоны излучались в точке *5* и поглощались в точке *6.* И это несмотря на то, что в примере *б* фотон был излучен и поглощен в *одно и то же время,* а в примере *в* был излучен *позже,* чем поглощен. В последней ситуации вы, может быть, предпочли бы сказать, что фотон был излучен в *6* и поглощен в *5,* ведь иначе фотон должен был бы лететь *вспять* во времени! Постольку поскольку это касается вычислений (и Природы), это все равно (и все возможно). Поэтому мы говорим просто, что произошел «обмен» фотоном и подставляем пространственно-временные положения в формулу для $P(A\text{–}B)$

стрелок. Вот почему студенты целых четыре года учатся делать это эффективно — а ведь мы рассматриваем *легкую* задачу! (Когда задачи становятся слишком трудными, мы решаем их с помощью компьютера!)

Я хотел бы отметить следующее относительно поглощения и излучения фотонов. Если точка *6* расположена позже,

чем точка *5*, мы можем сказать, что фотон излучился в *5* и поглотился в *6* (см. рис. 61). Если точка *6* расположена раньше, чем *5*, мы, вероятно, предпочли бы сказать, что фотон излучился в *6* и поглотился в *5*. Но с таким же успехом мы могли бы сказать, что фотон движется вспять во времени! Нам, однако, не надо беспокоиться о том, в каком направлении в пространстве-времени летит фотон; все это учтено в формуле для *P*(*5–6*), и мы говорим, что произошел «обмен» фотоном. Разве не замечательно, что Природа так проста!*

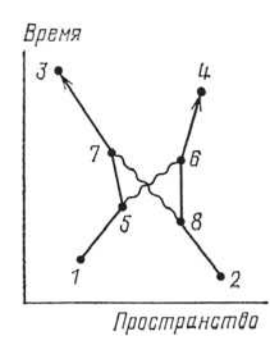


Рис. 62. Событие на рис. 59 может произойти еще одним способом (третьим): путем обмена *двумя* фотонами. Для этого способа (как мы увидим подробнее ниже) имеется множество диаграмм, одна из которых здесь показана. Стрелка для этого способа учитывает все возможные положения промежуточных точек *5*, *6*, *7* и *8*, и поэтому вычислять ее очень трудно. Поскольку *j* меньше, чем 0,1, длина этой стрелки, вообще говоря, меньше, чем одна десятитысячная (так как в процессе происходят четыре взаимодействия) — по сравнению с несодержащими *j* стрелками «первого способа» и «второго способа» на рис. 59

Далее, вдобавок к обмену фотоном между точками *5* и *6*, возможен обмен другим фотоном — между точками *7* и *8* (см. рис. 62). Я слишком устал, чтобы выписывать все основные действия, стрелки которых должны быть перемножены,

---

*Такой обменный фотон, который никогда не фигурирует в начальном и конечном условиях эксперимента, иногда называют «виртуальным фотоном».

но, как вы могли заметить, каждая прямая линия дает $E(A-B)$, каждая волнистая линия дает $P(A-B)$, а каждое взаимодействие дает j. Итак, имеются шесть $E(A-B)$, два $P(A-B)$ и четыре j — и так для *любых возможных точек 5, 6, 7* и *8*! Это дает миллиарды маленьких стрелочек, которые надо перемножить и потом сложить!

Кажется, вычисление амплитуды этого простого события — дело безнадежное. Однако если вы студент, и вам надо получить диплом, то вы работаете.

Но надежда на успех *есть*. Она основана на этом магическом числе j. В первых двух способах, которыми может произойти событие, j не фигурирует; в следующем способе имеется $j \cdot j$, а в последнем рассмотренном нами — $j \cdot j \cdot j \cdot j$. Так как $j \cdot j$ меньше 0,01, это означает, что длина стрелки для этого способа, вообще говоря, составляет меньше 1 % длины стрелки для первых двух способов. Стрелка с $j \cdot j \cdot j \cdot j$ будет меньше, чем 1 % от 1 %, т.е. одна десятитысячная часть в сравнении со стрелками, не содержащими j. Если у вас достаточно компьютерного времени, можете рассмотреть возможности, содержащие j^6 — одну миллионную часть, при этом ваши расчеты будут соответствовать точности экспериментов. Вот так и рассчитываются простые события. Именно таким образом все и устроено!

Рассмотрим теперь другое событие. Мы начинаем, имея фотон и электрон, и заканчиваем, имея фотон и электрон. Один из способов осуществления этого события состоит в том, что сначала фотон поглощается электроном, электрон немного пролетает и испускает новый фотон. Этот процесс называется рассеянием света. Рисуя диаграммы и проводя расчеты для рассеяния, мы должны учитывать некоторые необычные возможности (см. рис. 63). Например, электрон может испустить фотон *до* того, как поглотит фотон (*б*).

Еще более странная возможность (*в*) состоит в том, что электрон испускает фотон, затем *летит вспять во времени,*

поглощает фотон и затем снова летит вперед во времени. Путь, пройденный таким «движущимся вспять» электроном, может быть настолько длинным, что проявится в реальном физическом эксперименте в лаборатории. Его поведение учитывается этими диаграммами и выражением $E(A-B)$.

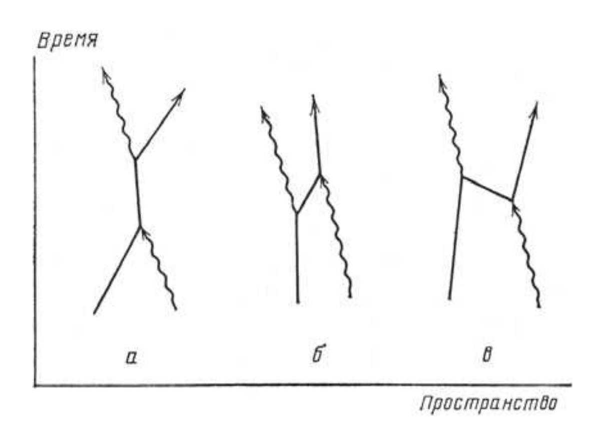


Рис. 63. При рассеянии света фотон может сначала поглощаться электроном, а потом излучаться (*а*). Такая последовательность событий необязательна, как видно из примера *б*. Пример иллюстрирует странную, но реальную возможность: электрон излучает фотон, мчится вспять во времени, чтобы поглотить фотон, а затем снова летит вперед во времени

Движущийся вспять электрон, если его рассматривать в правильном направлении времени, оказывается таким же, как обычный электрон, за исключением того, что притягивается к нормальному электрону— мы говорим, что у него «положительный заряд». (Если бы я учел поляризацию фотонов, стало бы очевидно, почему j у движущегося вспять электрона имеет обратный знак, делая его заряд положительным.) По этой причине он называется «позитроном». Пози-

трон — это частица, родственная электрону. Он представляет собой пример «античастицы»*.

Это общее явление. Каждая частица в Природе обладает амплитудой движения вспять во времени, и, следовательно, имеет античастицу. Когда частица и античастица сталкиваются, они аннигилируют и образуют другие частицы. (При аннигиляции электрона и позитрона получается обычно фотон или два фотона.) А что же фотоны? Как мы видели, фотоны совершенно не изменяются при движении вспять во времени — поэтому они сами себе античастицы. Видите, как ловко мы сделали исключение частью правила.

Я хотел бы показать вам, как выглядит этот движущийся вспять электрон, когда сами мы движемся вперед по времени. Проведя для наглядности ряд параллельных прямых, я разделю диаграмму на временные отрезки точками T_0, . . ., T_{10} (см. рис. 64). Мы начинаем в момент времени T_0: электрон и фотон движутся навстречу друг другу. Внезапно в момент времени T_3 фотон превращается в две частицы, позитрон и электрон. Позитрон живет недолго, вскоре, в момент T_6, он сталкивается с электроном, и при их аннигиляции образуется новый фотон. Тем временем электрон, образовавшийся из первоначального фотона, продолжает двигаться в пространстве-времени.

Следующее, о чем я хотел бы рассказать,— это электрон в атоме. Чтобы понять поведение электронов в атомах, мы должны добавить в нашу картину мира еще один важный объект — тяжелое ядро в центре атома, содержащее по крайней мере один протон. (Протон — это ящик Пандоры, кото-

---

* Дирак предсказал существование «антиэлектронов» в 1931 г., а в следующем году Карл Андерсон обнаружил их экспериментально и назвал «позитронами». Сегодня позитроны легко изготовляются (например, при столкновении двух фотонов) и хранятся неделями в магнитном поле.

рый мы откроем на следующей лекции.) Я не буду объяснять вам в этой лекции истинные законы поведения ядра — они очень сложны. Но в данном случае, когда ядро спокойно, мы можем приближенно описать его как частицу с амплитудой попадания из одной точки пространства-времени в другую

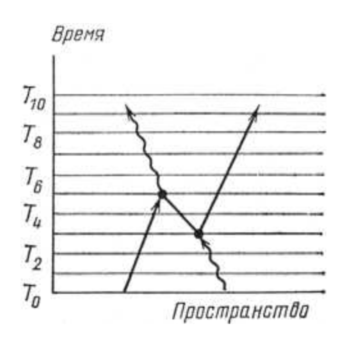


Рис. 64. Рассмотрим пример в на рис. 63, двигаясь только вперед во времени (как мы вынуждены поступать в лаборатории). От момента времени T_0 до T_3 мы видим, что электрон и фотон летят навстречу друг другу. Внезапно в момент T_3 фотон «распадается» и появляются *две* частицы электрон и частица нового типа — «позитрон» (представляющая собой электрон, движущийся вспять во времени). Позитрон движется навстречу исходному электрону. В момент времени T_5 позитрон аннигилирует с исходным электроном и образуется новый фотон. Тем временем образованный исходным фотоном электрон продолжает лететь вперед по пространству-времени. Такая последовательность событий наблюдается в лаборатории, она автоматически, не требуя никаких изменений, учитывается формулой $E(A–B)$

по формуле $E(A—B)$, но со значительно большей величиной параметра n. Поскольку ядро по сравнению с электроном очень тяжелое, мы можем приближенно считать, что, двигаясь во времени, оно стоит практически на одном месте в пространстве.

Простейший атом — атом водорода — состоит из протона и электрона. Протон удерживает танцующий вокруг него электрон, обмениваясь с ним фотонами (см. рис. 65)*. Атомы, содержащие более одного протона и соответствующее количество электронов, также рассеивают свет (атомы атмосфер-

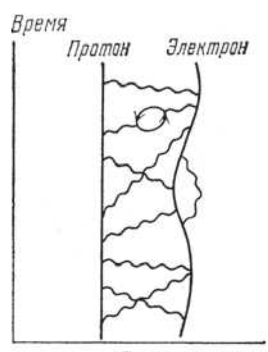


Рис. 65. Электрон удерживается вблизи от ядра атома путем обмена фотонами с протоном («ящик Пандоры», в который мы заглянем в четвертой лекции). Воспользуемся пока приблизительным определением протона как неподвижной частицы. Здесь показан атом водорода, состоящий из протона и электрона, обменивающихся фотонами

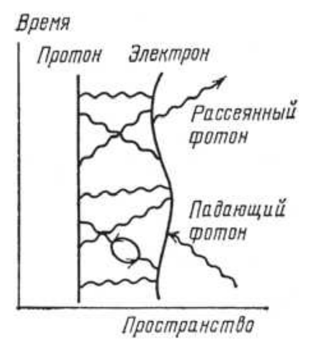


Рис. 66. Рассеяние света электроном атома — это явление, лежащее в основе частичного отражения света стеклом. Диаграмма показывает один из способов, которым такое событие может произойти в атоме водорода

ного воздуха рассеивают солнечный свет и делают небо голубым), но на диаграммах для таких атомов было бы так много прямых и волнистых линий, что получилась бы полная неразбериха!

---

* Амплитуда обмена фотоном равна $(-j) \cdot P(A-B) \cdot j$ — два взаимодействия и амплитуда попадания фотона из одной точки в другую. Амплитуда взаимодействия протона с фотоном равна $-j$.

Теперь я хотел бы показать вам диаграмму рассеяния света электроном в атоме водорода (см. рис. 66). В то время как электрон и ядро обмениваются фотонами, извне к атому прилетает фотон, сталкивается с электроном и поглощается им; затем излучается новый фотон. (Как обычно, надо рассмотреть и другие возможности, например, сначала излучается новый фотон, а потом уже поглощается старый фотон.) Амплитуды всех возможных способов рассеяний фотона электроном могут быть просуммированы в результирующую стрелку посредством операций сжатия и поворота. (Впоследствии мы будем называть эту стрелку «*S*».) Ее величина зависит от ядра и расположения электронов в атоме, она различна для различных веществ.

Теперь давайте снова посмотрим на частичное отражение света от стеклянной пластинки. Как оно происходит? Я говорил, что свет отражается от передней и от задней поверхностей. Говоря о поверхностях, я делал некоторое упрощение. На самом деле поверхности никак не действуют на свет. Входящий в стекло фотон рассеивается электронами атомов стекла, и в детектор попадает *новый* фотон. Интересно, что сложение миллиардов маленьких стрелочек, отвечающих амплитуде рассеяния входящего фотона всеми электронами стекла, можно заменить сложением всего двух стрелок — для «передней поверхности» и «задней поверхности» — и получить тот же самый ответ. Давайте разберемся почему.

Чтобы с этой точки зрения разобраться в отражении света от стеклянной пластинки, надо принять во внимание временно́е измерение. Прежде, говоря о свете монохроматического источника, мы использовали вымышленные часы, запускаемые на время, пока летит фотон. Стрелка часов определяла поворот амплитуды для данного пути. В формуле *P*(*A*–*B*) (для амплитуды попадания фотона из одной точки в другую) никакие повороты не упоминаются. Что произошло с часами? Что произошло с поворотами?

В первой лекции я просто сказал, что источник света является монохроматическим. Чтобы правильно разобраться в частичном отражении от пластинки, мы должны внимательно рассмотреть источник монохроматического света. Амплитуда излучения фотона источником, как правило, меняется со *временем:* со временем изменяется направление этой амплитуды. Источник белого света — смеси многих цветов — излучает фотоны хаотическим образом: направление амплитуды изменяется резко и нерегулярно, рывками. Но конструируя *монохроматический* источник, мы делаем прибор, в котором все так тщательно устроено, что легко вычислить амплитуду излучения фотона в определенный момент времени: амплитуда вращается с *постоянной* скоростью, как стрелка часов. (На самом деле стрелка амплитуды вращается с той же скоростью, что и стрелка наших воображаемых часов, но в противоположном направлении — см. рис. 67.)

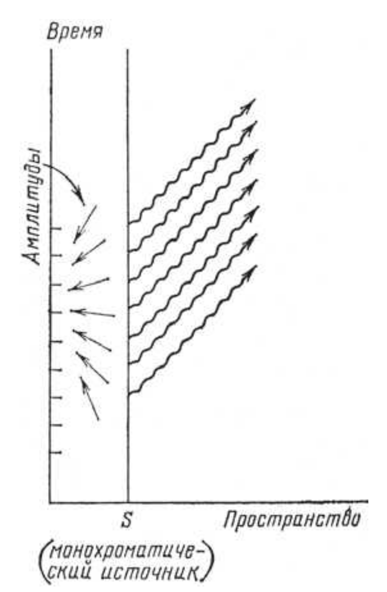


Рис. 67. Монохроматический источник света — это прекрасно сконструированный прибор, излучающий фотон легко предсказуемым способом: амплитуда излучения фотона в определенный *момент* поворачивается против часовой стрелки с течением времени. Поэтому амплитуда излучения фотона в более поздний момент имеет меньший угол поворота. Будем считать, что весь излучаемый источником свет распространяется со скоростью *c* (поскольку расстояния велики)

Скорость вращения зависит от цвета света: как и ранее, амплитуда синего источника вращается примерно в два раза быстрее, чем амплитуда красного источника. Итак, то, что мы использовали в качестве «воображаемых часов», было монохроматическим источником: на самом деле угол поворота амплитуды для данного пути зависит от того, в какой *момент* фотон вылетел из источника.

После излучения фотона стрелка не поворачивается, пока он летит из одной точки пространства-времени в другую. Хотя формула для $P(A-B)$ и утверждает, что у света есть амплитуда распространения со скоростью, *отличной* от c, в нашем эксперименте между источником и детектором относительно большое расстояние (по сравнению с атомными размерами), и сохраняется только вклад в длину $P(A-B)$, вносимый движением со скоростью c.

Чтобы заново начать рассматривать частичное отражение, прежде всего полностью определим наблюдаемое событие: детектор в A щелкает в определенный *момент* T. Затем разделим стеклянную пластинку на несколько очень тонких слоев, скажем, шесть (см. рис. 68, *а*). Анализ, проведенный на второй лекции, показал, что практически весь свет отражается от середины зеркала, и хотя каждый электрон и рассеивает свет по всем направлениям, после суммирования всех стрелок для каждого слоя единственным местом, где стрелки взаимно *не* гасятся, окажется как раз середина слоя, где свет будет рассеиваться в одном из двух возможных направлений: назад к детектору или прямо в глубь стекла. Поэтому результирующая стрелка события может быть получена путем сложения шести стрелок, соответствующих рассеянию света в шести промежуточных точках $X_1, \ldots, X_6$, расположенных друг над другом по всей толщине стекла.

Хорошо, давайте вычислим теперь стрелку для каждого из шести путей, по которым может лететь фотон,— через шесть точек $X_1, \ldots, X_6$. Каждый путь состоит из четырех

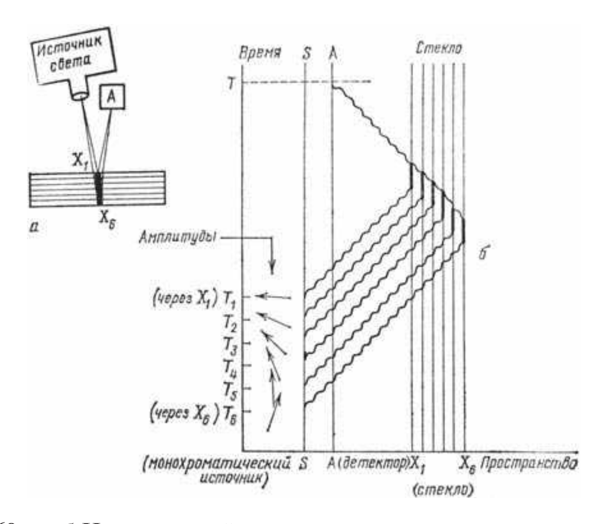


Рис. 68, *а—б*. Начнем новый анализ частичного отражения с того, что, разделив стеклянную пластинку на несколько слоев (в данном случае шесть), будем рассматривать различные пути, по которым свет может распространяться от источника к стеклу и назад, к детектору в точке *A*. Единственные существенные точки в стекле (где не гасятся амплитуды рассеяния) расположены в середине каждого слоя; реальное положение этих точек в глубине стекла показано на рис. *а*; на рис. *б* они изображены как вертикальные линии на пространственно-временном графике. Событие, вероятность которого мы рассчитываем, это срабатывание детектора в точке *A* в определенный момент времени *T*. Поэтому событие изображается точкой (с координатами *A* и *T*) на пространственно-временном графике. Каждый способ, которым может произойти событие, состоит из четырех последовательных этапов, поэтому надо перемножить четыре стрелки. Эти этапы показаны на рис. *б*: 1) в определенный момент фотон покидает источник (стрелки у отметок T_1, . . ., T_6 изображают амплитуды этого события в шесть различных моментов времени); 2) фотон летит из источника в одну из точек стекла (шесть взаимоисключающих возможностей изображены в виде шести волнистых линий, идущих вправо вверх); 3) электрон в одной из точек рассеивает фотон (этот этап изображен в виде короткой жирной вертикальной линии); 4) новый фотон летит к детектору и попадает в него в условленное время *T* (волнистая линия, направленная влево вверх). Амплитуды этапов *2, 3* и *4* одинаковы для всех шести возможностей, в то время как амплитуды первого шага различны по сравнению с фотоном, рассеянным на поверхности стекла (в точке X_1), фотон, рассеянный в глубине стекла, например в точке X_2, должен покинуть источник *раньше,* в момент времени T_2

этапов. (Это значит, что надо будет перемножить четыре стрелки.)

— Э т а п 1: В определенный момент источник излучает фотон.

— Э т а п 2: Фотон летит от источника к одной из точек в стекле.

— Э т а п 3: Фотон рассеивается электроном в этой точке.

— Э т а п 4: Новый фотон летит к детектору.

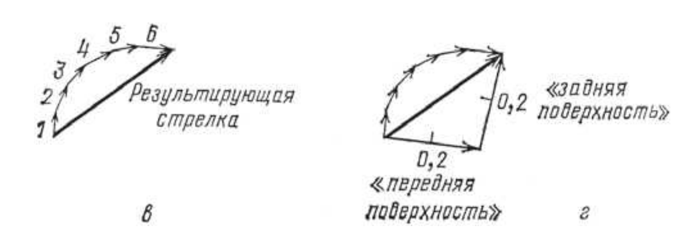


Рис. 68, *в—г*. Закончив умножать стрелки для каждой возможности, получим стрелки, показанные на рис. *в*. Они короче, чем стрелки на рис. *б*, каждая повернута на 90° (в соответствии с рассеивающими свойствами электронов стекла). При сложении эти шесть стрелок образуют дугу, результирующая стрелка является хордой этой дуги. Можно получить такую же результирующую стрелку, нарисовав две радиальные стрелки (направленные по радиусам дуги, (см. рис. *г*) и «вычтя» одну из другой, т.е. повернув стрелку «передней поверхности» в обратную сторону и сложив со стрелкой «задней поверхности». Эта замена была использована для упрощения изложения в первой лекции

Мы будем считать, что амплитуды для этапов *2* и *4* (фотон летит к точке в стекле и от нее) имеют длину, равную 1, и нулевой угол поворота, поскольку можно предположить, что свет не теряется и не рассеивается между стеклом и детектором. Амплитуда этапа *3* (рассеяния фотона электроном) является константой — *S* (сжатие и поворот на некоторую величину) — и одинакова всюду внутри стекла. (Эта величина,

как я отмечал ранее, различна для разных веществ. Для стекла поворот *S* равен 90°.) Следовательно, из четырех стрелок, которые нужно перемножить, только стрелка для этапа *1* — амплитуда излучения в определенный момент — будет разной для разных путей.

Момент, когда фотон должен вылететь из источника, чтобы достичь детектора *A* в момент *T* (см. рис. 68, *б*), будет разным для шести различных путей. Фотон, рассеянный в точке X_2, должен быть излучен несколько *раньше,* чем фотон, рассеянный в X_1, поскольку его путь длиннее. Поэтому стрелка в T_2 повернута на несколько больший угол, чем в T_1 — ведь пока время идет, амплитуда излучения фотона в определенный момент для монохроматического источника вращается против часовой стрелки. Это же относится к каждой стрелке вплоть до T_6: все шесть стрелок имеют одинаковую длину, но повернуты на разные углы, т.е. указывают в разных направлениях, поскольку относятся к фотону, излучаемому источником в разные моменты времени.

Сжимая стрелку, относящуюся к T_1, в число раз, предписанное этапами *2, 3* и *4* и поворачивая ее на 90°, предписанные этапом 3, получаем стрелку *1* (см. рис. 68, *в*). Следовательно, стрелки *1*, . . ., *6* имеют одинаковую (уменьшенную) длину и повернуты друг относительно друга на такой же угол, что и стрелки, характеризующие излучение фотона в $\mathrm{T}_1, \ldots, \mathrm{T}_6$.

Сложим теперь стрелки *1*, . . ., *6.* Последовательно соединяя стрелки, получим нечто вроде дуги окружности. Результирующая стрелка служит хордой этой дуги. Длина результирующей стрелки возрастает по мере утолщения стекла: больше толщина стекла — больше слоев, больше стрелок — и получается большая дуга окружности. И так до тех пор, пока не получится половина окружности (результирующая стрелка в этом случае является диаметром). Затем, при нарастающей по-прежнему толщине стекла, длина результирующей стрелки начинает *убывать,* дуга превращается в полную ок-

ружность, и начинается новый период. Квадрат длины результирующей стрелки равен вероятности, которая за цикл колеблется в пределах от нуля до 16 %.

Для получения этого ответа можно применить математический трюк (см. рис. 68, *г*): соединив стрелками центр окружности с хвостом стрелки *1* и головой стрелки *6,* получим две радиальные стрелки. Если повернуть первую из них на 180° и сложить со второй (т.е. «вычесть» первую из второй), получим прежнюю результирующую стрелку! Именно это я и делал на первой лекции: эти два радиуса и есть те две стрелки, которые, как я говорил, соответствуют отражению от «передней поверхности» и «задней поверхности». Каждая радиальная стрелка имеет хорошо известную нам длину 0,2*.

Таким образом, мы можем правильно вычислить вероятность частичного отражения, предположив (ложно), что все отражение происходит только от передней и задней поверхности. При таком интуитивно простом расчете стрелки «передней поверхности» и «задней поверхности» — это дающие правильный ответ математические построения. В то же вре-

---

* Радиус дуги явно зависит от *длины* стрелки для каждого слоя. Эта длина в конечном счете определяется величиной *S*, амплитудой рассеяния фотона электроном в атоме стекла. Этот радиус можно вычислить, используя формулы трех основных действий для всего множества обменов фотонами, а затем суммируя амплитуды. Это очень сложная задача, но для относительно простых веществ радиусы были успешно вычислены, а закономерности их изменения от вещества к веществу легко понять, используя идеи квантовой электродинамики. Надо сказать, однако, что прямых вычислений, исходящих из первых принципов, для таких сложных веществ, как стекло, до сих пор никогда не проводилось. В таких случаях радиус определяется экспериментально. Для стекла было экспериментально обнаружено, что при прямом падении света радиус приблизительно равен 0,2.

мя проделанный нами только что анализ — в пространстве-времени со стрелками, образующими часть окружности, — более точно показывает, что происходит в действительности: частичное отражение — это рассеяние света электронами *внутри* стекла.

Теперь разберемся со светом, проходящим *сквозь* стекло. Во-первых, имеется некоторая амплитуда того, что фотон пролетит сквозь стекло ни разу не столкнувшись с электронами (см. рис. 69, *а*). В смысле длины это самая важная стрелка. Но имеются еще шесть других возможных путей, которыми фотон может попасть в детектор под стеклом: фотон может столкнуться в точке X_1, а новый фотон рассеется в B; фотон может столкнуться в точке X_2, а новый фотон рассеется в B, и т. д. Все шесть стрелок такой же длины, как и стрелки, образующие дугу в предыдущем примере: она определяется той же самой амплитудой рассеяния фотона в среде S. На этот раз все шесть стрелок направлены одинаково, так как все шесть путей с одним актом рассеяния имеют одинаковую длину. В таких прозрачных веществах, как стекло, эти малые стрелки направлены под прямым углом к основной стрелке. В результате сложения малых стрелок и основной стрелки получаем результирующую стрелку такой же длины, что и основная, но повернутую на небольшой угол. Чем толще стекло, тем больше будет малых стрелок и тем сильнее будет повернута результирующая стрелка. Так устроена фокусирующая линза; расположив на более коротких путях добавочные слои стекла, можно добиться того, чтобы результирующие стрелки для всех путей были направлены одинаково.

Эффект был бы таким же, если бы фотоны в стекле распространялись медленнее, чем в воздухе: результирующая стрелка сделала бы дополнительный поворот. Вот почему раньше я говорил, что свет в стекле (или воде) распространяется медленнее, чем в воздухе. В действительности «замед-

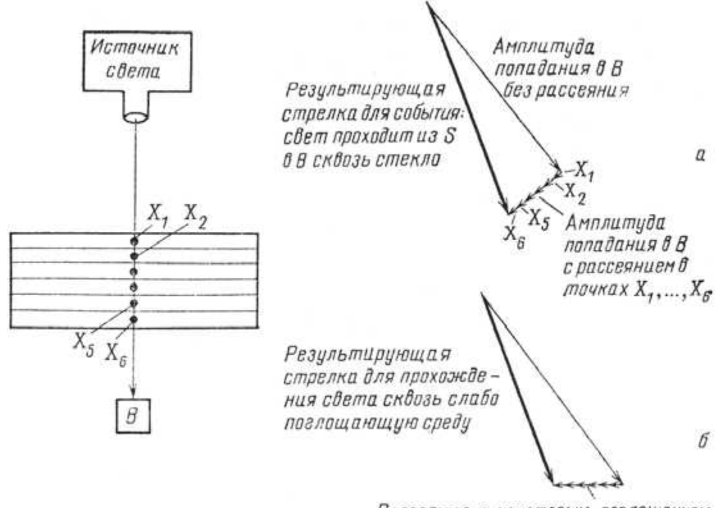


Рис. 69. Наибольший вклад в амплитуду прохождения света через стеклянную пластинку в детектор в точке *B* вносит часть, соответствующая отсутствию рассеяния на электронах стекла (*а*). К этой стрелке мы прибавляем шесть маленьких стрелок, отвечающих рассеянию света в каждом из слоев в точках $X_1, .., X_6$. Эти шесть стрелок имеют одинаковую длину (поскольку всюду внутри стекла амплитуда рассеяния одинакова), их направления совпадают (поскольку все пути от источника через любую из точек *X* к детектору имеют одинаковую длину). Сложив большую стрелку с маленькими, видим, что результирующая стрелка повернута сильнее, чем если бы свет распространялся прямо. По этой причине нам представляется, что путь через стекло занимает больше времени, чем через вакуум или воздух. Величина поворота результирующей стрелки, вызванного электронами вещества, называется «показателем преломления»

В случае прозрачных веществ маленькие стрелки направлены под прямым углом к основной стрелке. (На самом деле при учете двойного и тройного рассеяния, они несколько отклоняются, так что длина результирующей стрелки не превышает длины основной стрелки: Природа устроена так, что мы не можем получить на выходе из пластинки больше света, чем на входе.) В случае неполностью прозрачных (частично поглощающих свет) веществ маленькие стрелки направлены под тупым углом к основной стрелке. Поэтому результирующая стрелка получается значительно короче, чем ожидалось (*б*). Такая укороченная результирующая стрелка означает уменьшение вероятности прохождения фотона сквозь частично прозрачное вещество

ление» света объясняется добавочным вращением, связанным с рассеянием света атомами стекла (или воды). Величина этого добавочного поворота в данном веществе называется «показателем преломления вещества»*.

В случае поглощающих свет веществ малые стрелки направлены под тупым углом к основной стрелке (см. рис. 69, *б*). В итоге результирующая стрелка оказывается короче основной, что указывает на меньшую вероятность прохождения фотона сквозь частично прозрачное стекло, чем сквозь прозрачное.

Таким образом получается, что все явления, а также произвольные числа, о которых говорилось на первых двух лекциях, например, частичное отражение с амплитудой 0,2, «замедление» света в воде или в стекле, и т. д., более детально объясняются всего лишь тремя основными действиями — всего тремя, но объясняющими на самом деле и почти все остальное.

Трудно поверить, что почти все видимое бесконечное разнообразие Природы проистекает из монотонного повто-

---

* Стрелки, образующие дугу в случае рассеяния, равны по длине стрелкам, вызывающим поворот результирующей стрелки в случае прохождения сквозь вещество. Поэтому существует взаимосвязь между частичным отражением и показателем преломления данного вещества.

Создается впечатление, что длина результирующей стрелки превысила 1, т.е. сквозь стекло как бы проходит больше света, чем в него попало! Так кажется потому, что я не учел амплитуд следующих событий: фотон попадает в какой-то слой, новый фотон рассеивается в другой слой наверх, третий фотон рассеивается сквозь стекло вниз — и других, более сложных возможностей. Это приводит к отклонению малых стрелок, в результате чего длина результирующей стрелки удерживается в пределах от 0,92 до 1 (так что сумма вероятностей прохождения сквозь стеклянную пластинку и отражения от нее всегда равна 100 %).

рения трех основных действий. Но это так. Я немного расскажу о том, как возникает это разнообразие.

Мы можем начать с фотонов (см. рис. 70). Какова вероятность того, что два фотона, выйдя из точек *1* и *2* пространства-времени, попадут в два детектора в точках *3* и *4*? Для осуществления этого события имеются два основных способа, и каждый состоит из двух независимых процессов: фото-

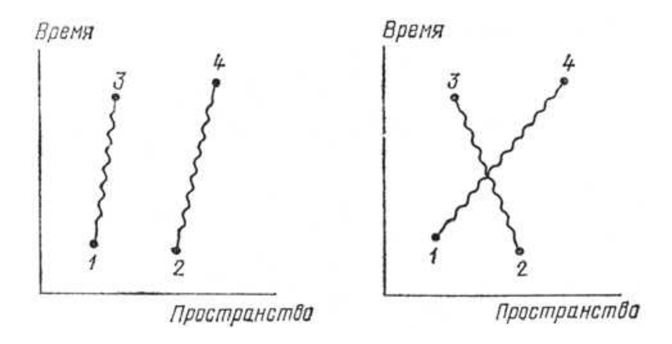


Рис. 70. Амплитуда попадания фотонов из точек *1* и *2* пространства-времени в точки *3* и *4* может быть приближенно найдена, если рассмотреть два изображенных на рисунке основных способа осуществления этого события: *P*(*1–3*) • *P*(*2–4*) и *P*(*1–4*) • *P*(*2–3*). При изменении относительного положения точек *1, 2, 3* и *4* в различной степени проявляется интерференция

ны могут лететь прямо — *P*(*1—3*) • *P* (*2—4*) — или «крест-накрест» — *P*(*1—4*) • *P*(*2—3*). Получающиеся таким образом амплитуды обеих возможностей складываются, и возникает (как мы видели на второй лекции) интерференция: длина результирующей стрелки меняется в зависимости от относительного положения пространственно-временны́х точек.

Что произойдет, если мы совместим точки *3* и *4* в пространстве-времени (см. рис. 71)? Скажем, оба фотона попадают в точку *3*. Посмотрим, как это скажется на вероятности события. В данном случае мы имеем *P*(*1—3*) • *P*(*2—3*) и

P(*2—3*) • *P*(*1—3*) — две одинаковые стрелки. При сложении их длина удвоится, что приведет к учетверению квадрата длины результирующей стрелки по сравнению с квадратом длины одной стрелки. Так как две стрелки одинаковы, они всегда «выстраиваются в одну линию». Другими словами, интерференция не флуктуирует при изменении положений точек *1* и *2,* она всегда положительна. Если бы мы не учиты-

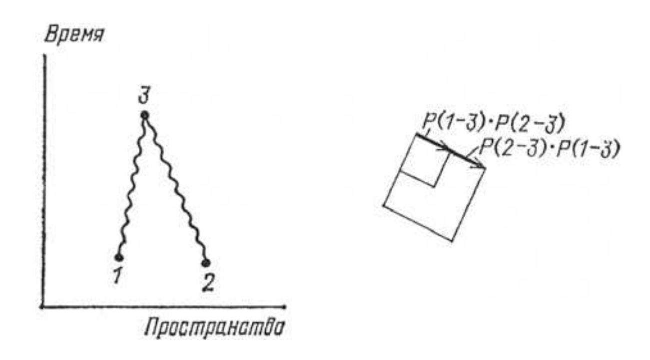


Рис. 71. Если совместить точки *4* и *3,* две стрелки *P*(*1—3*) • *P*(*2*—3) и *P*(*2—3*) • *P*(*1—3*) окажутся одинаковыми как по длине, так и по направлению. При сложении они выстраиваются в одну линию и образуют стрелку удвоенной длины (квадрат которой при этом возрастает в четыре раза). Таким образом, фотоны стремятся попасть в одну пространственно-временную точку. При увеличении числа фотонов этот эффект усиливается. Он лежит в основе действия лазера

вали такой всегда положительной интерференции двух фотонов, то мы ожидали бы, что вероятность возрастает в среднем в два раза. Вместо этого вероятность всегда возрастает в четыре раза. Когда мы имеем дело с большим числом фотонов, эта превосходящая наши ожидания вероятность возрастает еще сильнее.

Это приводит к целому ряду практических следствий. Можно сказать, что фотоны стремятся попасть в одинаковые

условия или «состояния». («Состояние» — это определенная пространственная зависимость амплитуды нахождения фотона.) Вероятность того, что атом излучит фотон, возрастает, если уже имеются фотоны в таком состоянии, в котором они могут быть излучены данным атомом. Это явление, получившее название «вынужденного излучения», открыл Эйнштейн, когда, предложив фотонную модель света, он положил начало квантовой теории. Работа лазеров основана на этом явлении.

Такое же рассуждение применимо и к нашим фальшивым электронам со спином нуль. Но в реальном мире, где электроны поляризованы, происходит нечто совсем другое: две стрелки, *E*(*1—3*) • *E*(*2—4*) и *E*(*1—4*) • *E*(*2—3*), вычитаются одна



Рис. 72. Если два электрона (с одинаковой поляризацией) пытаются занять одну и ту же точку в пространстве-времени, интерференция всегда отрицательна. (Так проявляется поляризация электронов.) Это значит, что две одинаковые стрелки *E*(*1—3*) • *E*(*2—3*) и *E*(*2—3*) • *E*(*1—3*) должны вычитаться друг из друга, в результате длина результирующей стрелки зануляется. Такое нежелание двух электронов занимать одно место в пространстве-времени называется «принципом запрета». Этим объясняется большое разнообразие атомов во Вселенной

из другой — т.е. перед сложением одна из них поворачивается на 180°. Если точки *3* и *4* совпадают, стрелки одинаковы как по длине, так и по направлению, и при вычитании взаимно уничтожаются (см. рис. 72). Это означает, что, в отли-

чие от фотонов, электроны не любят попадать в одно место, они бегут друг от друга как от чумы. Два электрона с одинаковой поляризацией не могут оказаться в одной точке пространства-времени — это явление называется «принципом запрета».

Этот принцип запрета, оказывается, лежит в основе великого разнообразия химических свойств атомов. Один протон обменивается фотонами с танцующим вокруг него одним электроном — это атом водорода. Два протона одного ядра обмениваются фотонами с двумя электронами (поляризованными в противоположных направлениях) — это атом гелия. Видите ли, у химиков сложный способ счета: вместо того чтобы говорить «один, два, три, четыре, пять протонов», они говорят: «водород, гелий, литий, бериллий, бор».

У электрона есть только два состояния поляризации, поэтому в атоме, где три протона ядра обмениваются фотонами с тремя электронами — он называется атомом лития — третий электрон расположен дальше от ядра, чем два других (занявших ближайшее возможное место), и реже обменивается фотонами. Такой электрон легко отрывается от своего ядра под действием фотонов других атомов. Большое число таких атомов, расположенных поблизости друг от друга, легко теряют свой собственный третий электрон, и получается целое море электронов, плавающих вокруг атомов. Если к этому морю электронов приложить слабую электрическую силу (фотоны), в нем образуется поток электронов — я описываю, как металлический литий проводит электрический ток. Водород и гелий не отдают свои электроны другим атомам. Они «изоляторы».

Все атомы — более ста их разновидностей — состоят из определенного числа протонов, которые обмениваются фотонами с таким же числом электронов. Способы расположения электронов сложны и обеспечивают громадное разнообразие свойств веществ: существуют металлы и изоляторы, газы и кристаллы.

Одни вещества мягкие, другие твердые, одни окрашены, другие прозрачны. И все это колоссальное разнообразие, как из рога изобилия, вытекает из принципа запрета и повторения снова, и снова, и снова трех очень простых действий *P*(*A*—*B*), *E*(*A*—*B*) и *j*. (Если бы у электронов не было поляризации, все атомы в мире имели бы очень похожие свойства: электроны собирались бы вместе, вблизи ядра своего атома, и не притягивались бы к другим атомам, образуя химические связи.)

Вам может показаться странным, каким образом такие простые действия могут создать столь сложный мир. Дело в том, что наблюдаемые нами явления представляют собой результат сложнейшего переплетения огромного числа обменов фотонами и интерференции. Знание трех фундаментальных действий — это только самое-самое начало в исследовании любой *реальной* ситуации, когда мы сталкиваемся с таким множеством обменов фотонами, что рассчитать их невозможно — надо приобрести опыт, чтобы научиться выделять наиболее важные возможности. Поэтому мы изобретаем такие понятия, как «показатель преломления» или «сжимаемость», или «валентность» — они помогают проводить расчеты приближенно, когда огромное количество деталей не просматривается. Это как игра в шахматы: одно дело знать основные правила, которые просты, и совсем другое — хорошо играть, тут надо понимать характер каждой позиции и природу разных положений, а это гораздо сложнее.

Разделы физики, изучающие вопросы типа «почему железо (с 26 протонами) является магнетиком, а медь (с 29 протонами) — нет» или «почему один газ прозрачен, а другой нет», называются «физикой твердого тела», «физикой жидкости» — в общем, настоящей физикой. Раздел физики, открывший три простых маленьких действия (самая простая часть), называется «фундаментальной физикой» — мы похитили это название, чтобы другие физики чувствовали себя неуютно! Совершенно очевидно, что самые интересные за-

дачи, притом имеющие, конечно, наибольшее практическое значение, возникают сегодня в физике твердого тела. Но кто-то сказал, что нет ничего более практического, чем хорошая теория, а квантовая электродинамика — это определенно хорошая теория!

В заключение я хотел бы вернуться к числу 1,00115965221 — я говорил на первой лекции, что есть число, измеренное и вычисленное с очень большой точностью. Это число характеризует отклик электрона на внешнее магнитное поле — нечто, называемое «магнитным моментом». Когда Дирак впервые разрабатывал правила нахождения этого числа, он использовал формулу для $E(A—B)$ и получил очень простой ответ, равный 1 в нашей системе. Диаграмма, по которой магнитный момент электрона вычисляется в этом первом приближении, очень проста — электрон летит из точки в точку в пространстве-времени и взаимодействует с фотоном из магнита (см. рис. 73).

Впоследствии было обнаружено, что эта величина не равна 1, что она чуть больше — примерно 1,00116. Эта поправка была вычислена Швингером в 1948 г.; она равняется $j \cdot j$, деленному на 2π, и обусловлена альтернативным способом попадания электрона из точки в точку: по пути электрон внезапно излучает фотон, а затем (о ужас!) его же и погло-

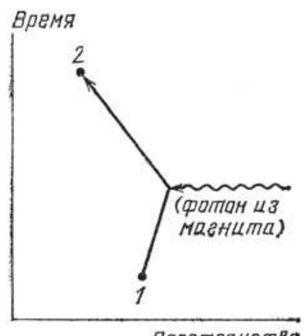


Рис. 73. Диаграмма для вычисления дираковского вклада в магнитный момент электрона очень проста. Величина, соответствующая этой диаграмме, принимается равной единице

щает (см. рис. 74). Может быть, в этом и есть нечто «безнравственное», но электрон это делает! Чтобы вычислить стрелку для этого случая, мы должны рассчитать стрелки для всех точек пространства-времени, где фотон может быть излучен или поглощен. То есть появятся две дополнительных *E*(*A—B*), одна *P*(*A—B*) и два *j*, которые надо перемножить. Студенты учатся делать это простое вычисление на втором курсе, изучая элементарную квантовую электродинамику.

Но постойте! Эксперименты дают настолько точную картину поведения электрона, что в наших расчетах мы должны учитывать еще и другие возможности: все пути, которыми электрон попадает из точки в точку с *четырьмя* дополнительными взаимодействиями. На рис. 75 показаны три способа, которыми электрон может излучить и поглотить два фотона.

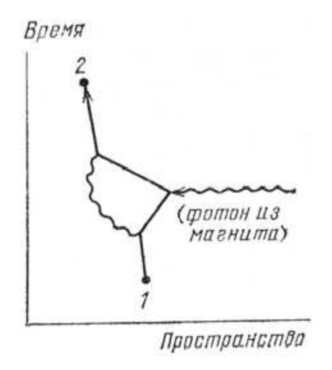


Рис. 74. Лабораторные эксперименты показывают, что настоящее значение магнитного момента электрона не равно, а несколько превышает 1. Это связано со следующей возможностью: электрон может испустить фотон, а затем поглотить его. Для описания этого процесса необходимы две дополнительных *E*(*A—B*), одна *P*(*A—B*) и два *j*. Швингер рассчитал, что учитывающая эту возможность поправка равна $j \cdot j/2\pi$. Поскольку на опыте эта возможность неотличима от основного способа распространения электрона (см. рис. 73) — и там, и там электрон вылетает из точки *1* и попадает в точку *2* — стрелки обеих возможностей складываются, и возникает интерференция

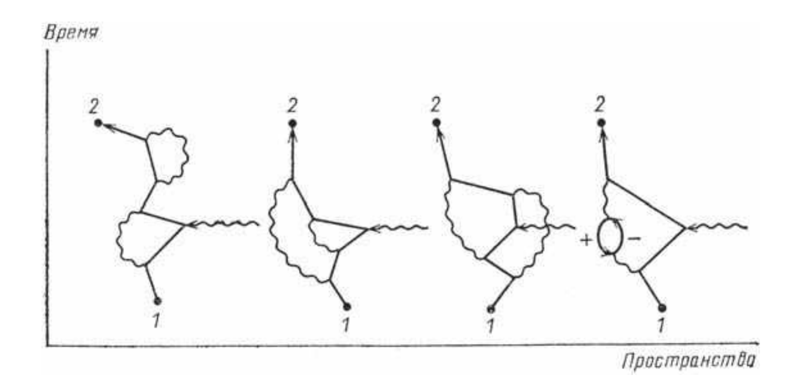


Рис. 75. При современной точности экспериментов необходимо учитывать диаграммы, содержащие четыре дополнительных взаимодействия (во всех возможных точках пространства-времени). Некоторые из таких диаграмм показаны на рисунке. Диаграмма справа содержит фотон, распадающийся на электрон-позитронную пару (см. рис. 64), аннигилирующую с образованием нового фотона, который и поглощается электроном

Имеется также и новая интересная возможность (показанная на рис. 75 справа): будучи излученным, фотон превращается в электрон-позитронную пару, которая — опять, если вы подавите свое «моральное» негодование,— аннигилирует и превращается в новый фотон, который затем поглощается электроном. Такую возможность тоже надо учитывать!

Две группы физиков в течение двух лет независимо вычисляли этот следующий вклад и еще год искали ошибку: у экспериментаторов получалось несколько иное значение. Какое-то время казалось, что теория впервые не соответствует эксперименту. Но нет, ошибка была арифметической. Как могли две группы сделать одинаковую ошибку? Оказалось, что к концу работы обе группы сравнили свои расчеты и сгладили имевшиеся в них расхождения. Так что эти расчеты на самом деле не были совсем независимыми.

Поправка с *шестью* дополнительными *j* предполагает еще большее число способов осуществления события, и я

нарисую некоторые из них (см. рис. 76). Двадцать лет потребовалось для того, чтобы получить теоретическое значение магнитного момента электрона с такой дополнительной точностью. Тем временем экспериментаторы выполнили еще более точные измерения и добавили несколько цифр к экспериментальному значению. И по-прежнему теория согласуется с экспериментом.

Итак, чтобы выполнить вычисления, мы рисуем эти диаграммы, выписываем, чему они соответствуют математически, и складываем амплитуды — все однозначно, как в поваренной книге. Поэтому все это может делать машина. Теперь, имея суперкомпьютеры, мы начали рассчитывать поправку с восемью дополнительными *j*. В настоящее время теорети-

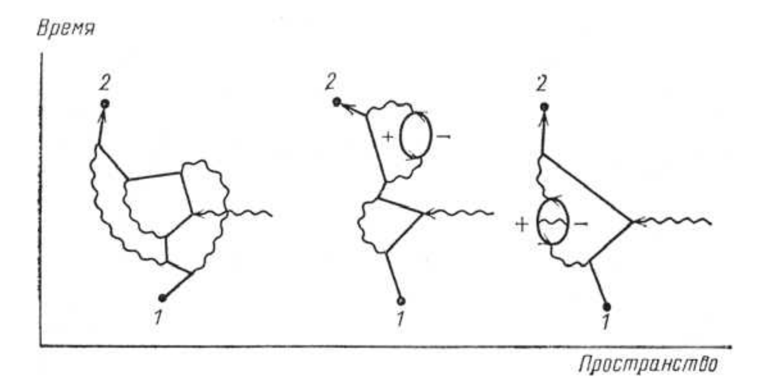


Рис. 76. И сейчас продолжаются вычисления, еще более повышающие точность теоретического значения. Следующий вклад в амплитуду, учитывающий все возможности с шестью взаимодействиями, состоит примерно из 70 диаграмм. Три из них показаны на рисунке. В 1983 г. теоретическое значение равнялось 1,00115965246 (с погрешностью около 20 в последних двух цифрах), экспериментальное — 1,00115965221 (с неопределенностью порядка 4 в последней цифре). Такая точность эквивалентна измерению расстояния от Лос-Анджелеса до Нью-Йорка (примерно 3000 миль) с точностью до толщины человеческого волоса

ческое значение равно 1,00115965246, экспериментальное— 1,00115965221 (±4 в последней цифре). Небольшая часть неопределенности теоретического значения (примерно 4 в последней цифре) связана с компьютерным округлением чисел; большая часть теоретической неопределенности (порядка 20) связана с тем, что значение *j* точно не известно. Поправка с восемью *j* состоит примерно из девяти сотен диаграмм, в математическом выражении для каждой из которых сто тысяч слагаемых. Это фантастические вычисления, и выполняются они прямо сейчас.

Я уверен, что в ближайшие годы теоретическое и экспериментальное значения магнитного момента будут получены с точностью до еще большего числа знаков. Конечно, я не уверен, что два значения будут по-прежнему совпадать. Ничего нельзя сказать, пока не будут выполнены расчеты и эксперименты.

Итак, мы совершили полный круг и вернулись к числу, которое я выбрал в начале лекций, чтобы произвести на вас впечатление. Надеюсь, теперь вы гораздо лучше понимаете значение этого числа: по нему видно, с какой потрясающей точностью мы все время проверяем правильность этой странной теории — квантовой электродинамики.

Читая эти лекции, я получил истинное наслаждение, показывая, что столь точная теория создается ценой разрушения здравого смысла. Мы должны примириться с очень причудливыми явлениями: усилением и подавлением вероятностей, отражением света от всех частей зеркала, распространением света не по прямой и со скоростью, меньшей или большей обычной скорости света, движением электронов вспять во времени, внезапным распадом фотонов на электрон-позитронные пары, и т. д. Мы должны примириться со всем этим — чтобы осознать, какие действия Природы лежат на самом деле в основе практически всех наблюдаемых нами явлений.

Если не считать технических деталей, связанных с поляризацией, я описал вам лежащую в основе нашего понимания

этих явлений концепцию. Мы рисуем *амплитуду* каждого из способов осуществления события, складываем эти амплитуды, в то время как в обычных условиях мы сложили бы вероятности, и умножаем амплитуды, в то время как в обычных условиях мы перемножили бы вероятности. На первых порах трудно думать обо всем на языке амплитуд из-за их абстрактности. Но человек вскоре привыкает к этому странному языку. Множество наблюдаемых нами ежедневно явлений основано всего лишь на трех основных действиях: одно описывается простой константой связи, два других — тесно связанными друг с другом функциями *P*(*A*—*B*) и *E*(*A*—*B*). Вот и все — и отсюда вытекают все остальные законы физики.

Однако прежде чем закончить эту лекцию, мне хотелось бы сделать несколько дополнительных замечаний. Можно понять дух и характер квантовой электродинамики и не рассматривая технических деталей, связанных с поляризацией. Но я уверен, что вам будет как-то не по себе, если я не расскажу вам немного о том, что до сих пор опускал. Оказывается, фотоны бывают четырех видов, называемых «состояниями поляризации». Геометрически эти состояния связаны с пространственными и временным направлениями. Таким образом, имеются фотоны, поляризованные в *X*-*,* *Y*-, *Z*- и *T*-направлениях. (Возможно, вы где-нибудь слышали, что свет имеет только два состояния поляризации — например, фотон, летящий в *Z*-направлении, может быть поляризован только в *X*- или *Y*-направлениях. Ну конечно, вы уже догадались: если фотон распространяется на большие расстояния и летит со скоростью света, амплитуды для *Z*- и *T*-компонент взаимно уничтожаются. Но в атоме, когда электрон и протон обмениваются виртуальным фотоном, наиболее важна *T*-компонента.)

Аналогично и электрон находится в одном из четырех состояний, которые тоже связаны с геометрией, но более тонким образом. Мы можем назвать эти состояния *1, 2, 3* и *4.* Вычисление амплитуды попадания электрона из точки *A* пространства-времени в точку *B* при этом усложняется, так как

мы теперь можем задавать такие вопросы: «Какова амплитуда того, что, вылетев из точки *A* в состоянии *2,* электрон попадает в точку *B* в состоянии *3*?» Шестнадцать возможных комбинаций — соответствующих четырем возможным начальным состояниям электрона в *A* и четырем возможным конечным состояниям в *B* — математически простым образом заключены в формуле для *E*(*A*—*B*), о которой я вам уже рассказывал.

Для фотонов такой модификации не требуется. Фотон, поляризованный в *X*-направлении в точке *A,* останется поляризованным в *X*-направлении и в точке *B,* попав туда с амплитудой *P*(*A*—*B*).

Благодаря поляризации происходит большое количество всевозможных взаимодействий. Например, мы можем спросить: «Какова амплитуда того, что электрон в состоянии *2* поглощает фотон, поляризованный в *X*-направлении, и превращается в электрон в состоянии *3*?» Не все возможные типы поляризованных электронов и фотонов взаимодействуют между собой, но те, что взаимодействуют, делают это с амплитудой *j*. (В некоторых случаях необходим еще дополнительный поворот стрелки на угол, кратный 90°.)

Существование состояний поляризации и природа взаимодействий могут быть очень изящно и красиво выведены из принципов квантовой электродинамики и двух дополнительных предположений: 1) результаты эксперимента не меняются, если экспериментальную установку повернуть на произвольный угол, и 2) они также не меняются, если установка движется в пространстве в космическом корабле с произвольной скоростью. (Это принцип относительности.) Этот изящный и общий анализ показывает, что каждая частица относится к тому или иному поляризационному классу. Так, мы говорим, что есть частицы со спином 0, спином $^1/_2$, спином 1, спином $^3/_2$, спином 2 и т. д. Частицы различных классов ведут себя по-разному. Частица со спином 0 — самая простая — имеет одну компоненту и вообще не поляризована. (Рассмотренные в этой лекции фальшивые фотон и электрон — это час-

тицы со спином 0. Фундаментальные частицы со спином 0 до сих пор не обнаружены.) Настоящий электрон — это пример частицы со спином $^1/_2$, а настоящий фотон — частицы со спином 1. Частицы со спином $^1/_2$ и 1 имеют четыре компоненты. Частицы других классов имеют больше компонент; например, частицы со спином 2 имеют десять компонент.

Я сказал, что связь между относительностью и поляризацией проста и изящна, но не уверен, что смогу рассказать о ней просто и изящно! (Для этого потребовалась бы по крайней мере одна дополнительная лекция.) Хотя сложности, связанные с поляризацией, и не обязательно учитывать, чтобы понять дух и характер квантовой электродинамики, но для конкретных расчетов они, конечно, очень существенны и имеют глубокие последствия.

В этих лекциях мы сосредоточились на относительно простых взаимодействиях между электронами и фотонами на очень малых расстояниях, взаимодействиях, в которых участвует небольшое число частиц. Но я хотел бы сделать еще одно или два замечания о том, как эти взаимодействия проявляются на больших расстояниях, когда происходит обмен очень и очень большим числом фотонов. На таких больших расстояниях расчет стрелок сильно усложняется. Имеются, однако, не столь сложные для анализа ситуации. Например, бывают обстоятельства, когда амплитуда излучения фотона источником не зависит от того, излучались ли другие фотоны. Это происходит, если источник очень массивен (ядро атома) или если множество электронов будет двигаться единообразно (например, колебаться вверх и вниз в антенне радиопередатчика или вращаться по обмотке электромагнита). В этом случае излучается большое количество фотонов в совершенно одинаковых состояниях. Амплитуда поглощения фотона электроном в таких условиях не зависит от того, поглощал ли до этого фотоны этот или любой другой электрон. Поэтому все поведение и описывается просто амплитудой по-

глощения фотона электроном, зависящей только от положения электрона в пространстве и времени. Для описания такой ситуации физики пользуются обычными словами. Они говорят, что электрон движется во внешнем поле. Физики употребляют слово «поле» для обозначения величины, которая зависит от положения в пространстве и времени. Хороший пример поля — температура воздуха, она меняется в зависимости от того, где вы ее измеряете. С учетом поляризации у поля становится больше компонент. (А именно, четыре — в соответствии с четырьмя амплитудами поглощения фотонов в разных состояниях поляризации (*X*, *Y*, *Z*, *T*). Эти компоненты называются векторным и скалярным электромагнитными потенциалами. В классической физике из комбинаций потенциалов получаются более удобные компоненты, называемые электрическим и магнитным полями.)

Если электрическое и магнитное поля меняются достаточно медленно, амплитуда перемещения электрона на большие расстояния зависит от траектории его полета. Как мы видели ранее в случае со светом, наиболее важны те траектории, при малом изменении которых углы амплитуд практически не меняются. В результате получается, что частица не обязательно должна лететь по прямой линии.

Все это возвращает нас к классической физике, в которой предполагается, что есть поля и что электроны движутся в них так, что некоторая величина принимает наименьшее значение. (Физики называют эту величину «действием» и формулируют этот закон как «принцип наименьшего действия».) Вот вам один пример того, как квантовая электродинамика объясняет макроскопические явления. Отсюда мы можем двигаться в разных направлениях, но нужно положить какие-то пределы нашим лекциям. Я хотел только напомнить вам, что и явления, наблюдаемые нами на больших масштабах, и странные процессы, наблюдаемые на малых масштабах, порождаются взаимодействием электронов и фотонов, и в конечном счете описываются квантовой электродинамикой.

Лекция 4

НЕРЕШЕННЫЕ ВОПРОСЫ

Эта лекция будет состоять из двух частей. Сначала я собираюсь поговорить о проблемах, связанных с квантовой электродинамикой как таковой, предположив, что на свете нет ничего, кроме электронов и фотонов. Затем я расскажу об отношении квантовой электродинамики ко всей остальной физике.

Вам может показаться, что наиболее шокирующая черта квантовой электродинамики — шаткая концепция амплитуд — указывает на какие-то проблемы, какое-то неблагополучие! Однако физики возятся с амплитудами уже больше пятидесяти лет и очень к ним привыкли. Более того, все новые частицы и новые наблюдаемые нами явления полностью соответствуют предсказаниям, которые можно вывести из этой концепции амплитуд, где вероятность события равна квадрату результирующей стрелки, длина которой определяется при помощи всяких хитрых способов соединения стрелок (с интерференцией и т. д.). Так что в *экспериментальном отношении* концепция амплитуд не подлежит *никакому сомнению*. Вы можете сколько угодно испытывать философское беспокойство относительно того, что же все-таки значат амплитуды (если они действительно что-то значат), но посколь-

ку физика — наука экспериментальная, а концепция согласуется с экспериментом, она нас пока устраивает.

В квантовой электродинамике имеется целый ряд проблем, связанных с усовершенствованием методов суммирования всех стрелок — разнообразных, используемых в разных обстоятельствах приемов, на изучение которых студенты

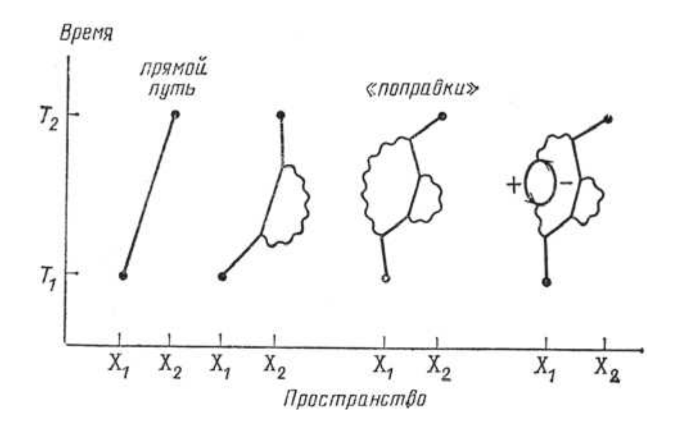


Рис. 77. При вычислении амплитуды попадания электрона из одной точки пространства-времени в другую для прямого пути мы используем формулу *E*(*A*—*B*). (Затем мы вычисляем «поправки», учитывающие испускание и поглощение одного или нескольких фотонов.) *E*(*A*—*B*) зависит от (X_3—X_1), (T_2—T_1) и числа *n*, которое мы должны подставить в формулу, чтобы получился правильный ответ. Число *n* называется «массой покоя» «идеального» электрона, оно не может быть измерено экспериментально, так как масса настоящего электрона *m* учитывает все «поправки». Для преодоления трудностей, возникающих при вычислении входящего в *E*(*A*—*B*) числа *n*, потребовалось двадцать лет

тратят три или четыре года. Это проблемы техники вычислений, и я не собираюсь их здесь обсуждать. Здесь речь идет просто о постоянном улучшении методов расчета в применениях теории к различным явлениям.

Но имеется одна дополнительная проблема, характерная именно для квантовой электродинамики как таковой, для решения которой потребовалось двадцать лет. Она связана с идеальными электронами и фотонами и числами *n* и *j*.

Если бы электроны были идеальными и летели от одной точки к другой во времени и пространстве *исключительно* по прямой (как показано слева на рис. 77), тогда не было бы проблем: *n* было бы просто массой электрона, которую можно определить при помощи наблюдений, а *j* — его «зарядом» (амплитудой взаимодействия электрона и фотона). Его также можно было бы определить экспериментально.

Но таких идеальных электронов не существует. Масса, которую мы наблюдаем в лаборатории,— это масса *реального* электрона, который время от времени испускает и поглощает свои собственные фотоны. Поэтому она зависит от амплитуды взаимодействия *j*. И заряд, который мы наблюдаем, отвечает взаимодействию между *реальным* электроном и *реальным* фотоном (который может время от времени образовывать электрон-позитронную пару) — и, следовательно, зависит от *E*(*A*—*B*), в свою очередь включающей в себя *n* (см. рис. 78). Так как эти и все другие взаимоисключающие возможности влияют на массу и заряд электрона, то экспериментально измеренная масса *m* и экспериментально измеренный заряд *e* отличаются от чисел *n* и *j*, которыми мы пользуемся в наших расчетах.

Если бы существовала определенная математическая связь между *n* и *j*, с одной стороны, и *m* и *e* — с другой, то все еще не было бы никаких проблем. Мы бы просто вычислили, с каких величин *n* и *j* надо начинать, чтобы в конце получились наблюдаемые значения *m* и *e*. (Если бы наши вычисления не совпали с *m* и *e*, мы подгоняли бы *n* и *j* до тех пор, пока все не совпало бы.)

Посмотрим, как мы на самом деле вычисляем *m*. Мы пишем ряд слагаемых, подобный ряду для магнитного мо-

мента электрона: первый член не содержит взаимодействий — это просто $E(A—B)$ — и представляет собой прямолинейное распространение идеального электрона из одной точки пространства-времени в другую. Второй член содержит два взаимодействия и учитывает испускание и поглощение фотона. Затем идут члены с четырьмя, шестью, восемью взаимодей-

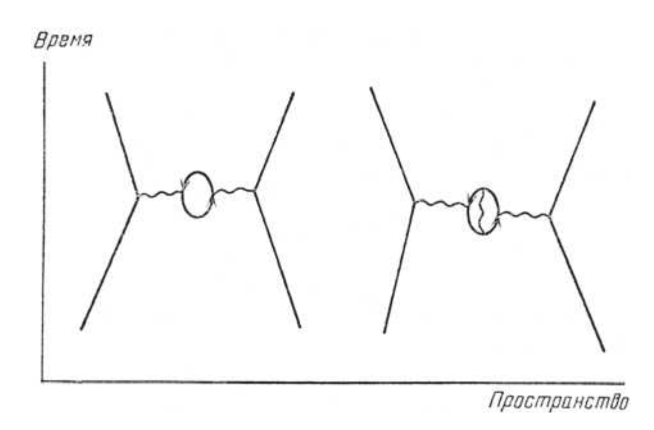


Рис. 78. Таинственное число *e* — экспериментально измеряемая амплитуда взаимодействия электрона с фотоном — учитывает все «поправки» для распространения фотона из одной точки пространства-времени в другую, две из этих поправок изображены на рисунке. При расчетах нам необходимо значение *j*, которое не учитывает этих поправок, а учитывает лишь движение фотона, прямо летящего из одной точки в другую. Сложности, возникающие при вычислении *j*, аналогичны возникающим при вычислении *n*

ствиями и т. д. (Некоторые из таких «поправок» показаны на рис. 77.)

При вычислении членов, содержащих взаимодействия, мы должны рассматривать (как обычно) все возможные точки, где может произойти взаимодействие, включая и такие случаи, когда точки, где происходит взаимодействие, налезают одна на другую, так что расстояние между ними

равно нулю. Проблема заключается в том, что, когда мы пытаемся учесть все расстояния вплоть до нулевых, выражение «рушится», давая бессмысленные ответы вроде бесконечностей. Когда квантовая электродинамика только появилась, это вызывало много тревог. Какую бы задачу ни пытались решить, получали бесконечность. (Чтобы быть математически последовательными, необходимо иметь возможность доходить до нулевых расстояний, но именно здесь не получается осмысленных значений для *n* и *j*. В этом и состоит проблема.)

А что если не учитывать все возможные расстояния между точками взаимодействия вплоть до нулевых, а *оборвать* вычисления на очень малом расстоянии — скажем, 10^{-30} см? Это в миллиарды и миллиарды раз меньше того, что может быть исследовано экспериментально в настоящее время — 10^{-16} см. В этом случае получаются определенные значения для *n* и *j*, такие, что вычисляемая масса совпадает с экспериментально наблюдаемой массой *m* и вычисляемый заряд совпадает с экспериментально наблюдаемым зарядом *e*. Но здесь ловушка: если кто-то другой обрывает свои вычисления на другом расстоянии, скажем, на 10^{-40} см, *ему* приходится брать *другие* значения *n* и *j*, чтобы получить такие же *m* и *e*!

Через 20 лет после возникновения квантовой электродинамики, в 1949 г., Ханс Бете и Виктор Вайскопф заметили следующее. Если два человека, основываясь в своих вычислениях на одинаковых значениях *m* и *e,* обрывают расчеты для *n* и *j* на разных расстояниях, а затем, используя соответствующие, но различные значения *n* и *j*, решают какую-то *другую* задачу (учитывая стрелки для всех поправок), ответы получаются практически одинаковыми! На самом деле, чем ближе к нулевому расстоянию обрывались вычисления *n* и *j*, тем лучше совпадали решения этой другой задачи! Швингер, Томонага и я независимо придумали, как проводить конкретные расчеты, и подтвердили это (мы получили за это

Нобелевскую премию). Наконец-то люди смогли вычислять при помощи квантовой электродинамики!

Итак, получается, что *единственное,* что зависит от малых расстояний между точками взаимодействия, — это значения *теоретических величин n и j, которые экспериментально никогда не наблюдаются.* Все остальное — все, что *можно* наблюдать, от малых расстояний, по-видимому, не зависит.

Уловка, при помощи которой мы находим *n* и *j*, имеет специальное название — «перенормировка». Но каким бы умным ни было слово, я назвал бы ее дурацким приемом! Необходимость прибегнуть к такому фокусу-покусу не позволила нам доказать математическую самосогласованность квантовой электродинамики. Удивительно, что до сих пор самосогласованность этой теории не доказана тем или иным способом: я подозреваю, что перенормировка математически незаконна. Но что *очевидно,* это то, что у нас нет хорошего математического аппарата для описания квантовой электродинамики: такая куча слов для описания связи между *n, j* и *m, e* — это не настоящая математика*.

---

* Другой способ преодолеть эту трудность — сказать, что, возможно, неверна сама идея, что две точки могут находиться как угодно близко друг от друга. То есть предположить, что нельзя пользоваться геометрией вплоть до предельно малых расстояний. Если мы допустим, что расстояния между двумя точками не бывают меньше, чем 10^{-100} см (напомню, что наименьшее расстояние, доступное современным экспериментам, порядка 10^{-16} см), то все в порядке, расходимости исчезнут. Но возникнут другие противоречия, например, суммарная вероятность того, что событие происходит (любым образом), будет немного больше или немного меньше 100%, или возникнут в малых количествах отрицательные энергии. Было высказано предположение, что эти противоречия возникают из-за того, что мы не учитываем гравитации — обычно очень-очень слабой, но становящейся существенной на расстояниях ~ 10^{-33} см.

С наблюдаемой константой связи *e* — амплитудой поглощения или излучения реального фотона реальным электроном — связан очень глубокий и красивый вопрос. Число *e,* в соответствии с экспериментами, равно примерно –0,08542455. (Мои друзья-физики не узнают этого числа, они привыкли пользоваться обратной величиной его квадрата, 137,03597 с погрешностью примерно 2 в последнем знаке. С тех пор, как его открыли свыше пятидесяти лет назад, это число остается тайной. Все хорошие физики-теоретики выписывают это число на стене и мучаются из-за него.)

Вам, конечно, хотелось бы узнать, как появляется это число: выражается ли оно через π, или, может быть, через основание натуральных логарифмов? Никто не знает. Это одна из *величайших* проклятых тайн физики: *магическое число,* которое дано нам и которого человек совсем не понимает. Можно было бы сказать, что это число написала «рука Бога», и «мы не знаем, что двигало Его карандашом». Мы знаем, что надо делать, чтобы экспериментально измерить это число с очень большой точностью, но мы не знаем, что делать, чтобы получить это число на компьютере — не вводя его туда тайно!

Хорошая теория гласила бы, что *e* равно, скажем, $\sqrt{3}$, деленному на $2\pi^2$. Время от времени появлялись предположения, чему равно *e,* но все они оказались бесполезными. Сначала Артур Эддингтон чисто логически доказал, что число, которое так любят физики, должно быть равно в точности 136 (это тогдашнее экспериментальное значение). После того, как более точные эксперименты показали, что число ближе к 137, Эддингтон обнаружил небольшую ошибку в своих рассуждениях и снова чисто логически доказал, что число равно в точности 137! Время от времени кто-нибудь замечает, что некоторая комбинация π, *e* (основания натуральных логарифмов), двоек и пятерок образует таинствен-

ную константу взаимодействия. Но знали бы те, кто любит играть с арифметикой, как *много* чисел можно получить, комбинируя π, *e* и т. д. Вот и следуют сквозь всю историю современной физики одна статья за другой с выводом *e* с точностью до нескольких значащих цифр — и только для того, чтобы не сойтись с результатами экспериментов после новых, более тщательных измерений.

Хотя мы и вынуждены сегодня прибегать к дурацкому приему для вычисления *j*, возможно, когда-нибудь будет найдена законная математическая связь между *j* и *e*. Это будет означать, что таинственным числом является *j*, а из него вытекает *e*. В таком случае, без сомнения, возникнет новая серия статей о том, как вычислить *j*, так сказать, на пальцах — что *j* равно $^{1}/_{4}\pi$ или что-нибудь в этом роде.

Вот и все проблемы, связанные с квантовой электродинамикой.

Когда я планировал эти лекции, я собирался сосредоточиться только на очень хорошо известном нам разделе физики, описать его со всей полнотой, и больше ничего не говорить. Но я профессор (а это означает, что я не способен вовремя остановиться). Поэтому теперь, когда дело сделано, я не могу устоять против искушения рассказать вам немного об остальной физике.

Во-первых, я должен сразу же сказать, что вся остальная физика проверена далеко не так хорошо, как электродинамика. Часть из того, о чем я собираюсь рассказать,— хорошие догадки, часть — не до конца разработанные теории, часть — чистая спекуляция. Так что эта лекция будет выглядеть довольно путано по сравнению с предыдущими. Тем не менее оказывается, что структура КЭД служит отличной основой для описания других явлений в остальной физике.

Я начну с рассказа о протонах и нейтронах, из которых состоят атомные ядра. После открытия протонов и нейтронов считалось, что они простые частицы (простые в том смысле,

что их амплитуда попадания из одной точки в другую описывается формулой *E*(*A*—*B*) с другим значением *n*). Но очень скоро стало ясно, что это отнюдь не так. Например, магнитный момент протона, если его рассчитывать так же, как магнитный момент электрона, был бы близок к 1. Но на самом деле экспериментально получается нечто нелепое — 2,79! Поэтому быстро осознали, что внутри протона происходит что-то, не объясняемое уравнениями квантовой электродинамики. Нейтрон, если он действительно нейтрален, не должен бы вообще взаимодействовать с магнитным полем. Но у него оказался магнитный момент — примерно –1,93! Так что уже давно было известно, что и в нейтроне происходит нечто сомнительное.

Существовала и еще одна проблема: что связывает протоны и нейтроны внутри ядра? Сразу стало ясно, что это не может быть обмен фотонами, так как силы, стягивающие ядро, слишком велики. (Энергия, необходимая для разрушения ядра, во столько же раз превосходит необходимую для выбивания электрона из атома, во сколько атомная бомба разрушительнее динамита: при взрыве динамита перераспределяются электроны, тогда как при взрыве атомной бомбы перераспределяются протоны и нейтроны.)

Для того чтобы узнать, какая сила удерживает ядро, было поставлено много экспериментов, в которых протоны со все более возрастающими энергиями сталкивались с ядрами. Ожидалось, что вылетать будут только протоны и нейтроны. Но когда энергии стали достаточно большими, начали вылетать новые частицы. Сначала появились пионы, потом лямбда, сигма, ро-частицы, и не хватило алфавита. Тогда появились частицы с числами (их массами): например, сигма-1190 и сигма-1386. Скоро стало ясно, что число частиц в мире не ограничено и зависит от энергии, потраченной на разрушение ядра. В настоящее время открыто более четырехсот таких частиц. Мы не можем смириться с тем, что су-

ществуют четыре сотни элементарных частиц — это слишком сложно!*

Великие изобретатели вроде Мёрри Гелл-Манна чуть с ума не посходили, пытаясь вывести правила, которым подчиняются эти частицы, и в начале 70-х годов они создали теорию сильных взаимодействий (или «квантовую хромодинамику»), в которой основными действующими лицами являются частицы, получившие название «кварков». Все частицы, состоящие из кварков, разделяются на два класса: одни — типа протона и нейтрона — состоят из трех кварков (они получили ужасное название «барионы»), другие — на-

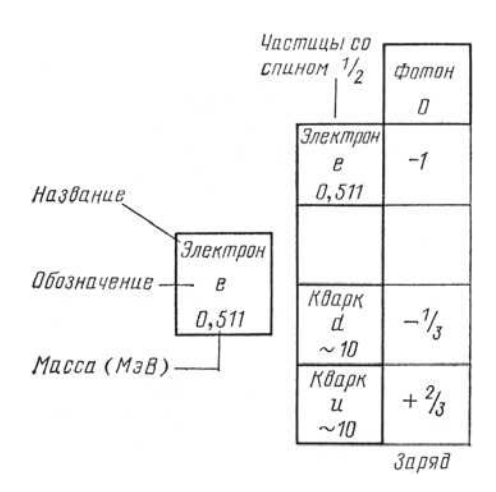


Рис. 79. Наша таблица частиц мира начинается с частиц «со спином $^1/_2$». Это электрон (с массой 0,511 МэВ), и кварки двух «ароматов» *u* и *d* (с массой у каждого порядка 10 МэВ). Электрон и кварки имеют «заряд» (т. е. взаимодействуют с фотонами), равный (в единицах константы взаимодействия *j*) -1, $-^1/_3$, и $+^2/_3$

* Так много типов частиц вылетает из ядра в экспериментах при высоких энергиях. В то же время при низких энергиях — в более обычных условиях — эксперименты показывают, что ядро содержит только протоны и нейтроны.

пример пион — состоят из кварка и антикварка (они называются «мезонами»).

Позвольте показать вам принятую сейчас таблицу фундаментальных частиц (см. рис. 79). Я начну с частиц, распространяющихся от точки к точке в соответствии с формулой *E*(*A*—*B*), которая видоизменена, как и в случае электрона, чтобы учесть поляризацию. Они называются частицами «со спином $^1/_2$». Первая из этих частиц — электрон, и его массовое число 0,511 (в единицах, которые мы все время используем — МэВ)*.

Под электроном я оставлю свободное место (оно будет занято позднее), а еще ниже впишу кварки двух типов — *d* и *u*. Масса этих кварков точно не известна; предполагается, что у каждого она порядка 10 МэВ. (Нейтрон немного тяжелее протона, что вроде бы подразумевает — и вы это скоро увидите — что *d*-кварк несколько тяжелее, чем *u*-кварк.)

Вслед за каждой частицей я выписываю ее заряд или константу взаимодействия в единицах —*j*. Это число, взятое с обратным знаком, характеризует взаимодействие с фотоном. Таким образом, получается, что заряд электрона равен —1, что соответствует традиционному значению, введенному еще Бенджамином Франклином. Для *d*-кварка амплитуда взаимодействия с фотоном равна $-^1/_3$, для *u*-кварка — $+^2/_3$. (Если бы Бенджамин Франклин знал о кварках, он мог бы по крайней мере сделать заряд электрона равным —3!)

Заряд протона равен +1, нейтрона — нулю. После некоторого подбора чисел вы можете видеть, что протон, состоящий из трех кварков, должен содержать два *u*-кварка и один *d*-кварк. А нейтрон, также состоящий из трех кварков, должен содержать два *d*-кварка и один *u*-кварк (см. рис. 80).

---

* Масса в 1 МэВ очень мала — примерно $1{,}78 \cdot 10^{-27}$ г, но эта единица массы удобна для таких частиц.

Что удерживает вместе кварки? Может быть, летающие взад и вперед фотоны? (*d*-кварк имеет заряд $-^1/_3$, а *u*-кварк — $+^2/_3$, поэтому они, как и электроны, испускают и поглощают

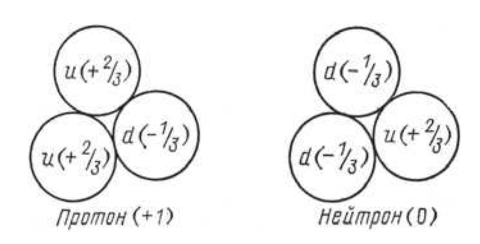


Рис. 80. Все частицы, состоящие из кварков, принадлежат к одному из двух классов. Одни состоят из кварка и антикварка, а другие из трех кварков. Самые известные из этих последних — протон и нейтрон. Заряды *u*-кварка и *d*-кварка комбинируются в +1 для протона и в 0 для нейтрона. Тот факт, что протон и нейтрон состоят из движущихся внутри них заряженных частиц, дает ключ к пониманию того, почему у протона магнитный момент превышает 1, а у, казалось бы, нейтрального нейтрона не равен нулю

фотоны.) Нет, электрические силы слишком слабы для этого. Тогда придумали нечто другое, что летает взад и вперед и удерживает кварки вместе; это нечто назвали «глюоны»*.

---

* Обратите внимание на названия: «фотон» происходит от греческого слова «свет», «электрон» — от греческого «янтарь» (с янтаря начиналось электричество). Но по мере развития современной физики в названиях частиц стало сказываться явное снижение интереса к древнегреческому, и вот мы придумали такие названия как «глюоны». Вы догадываетесь, почему они так называются? На самом деле *d* и *u* — это сокращения, но я не хочу вас путать: *d*-кварк ничуть не «ниже» *u*-кварка, а *u*-кварк ничуть не «выше» *d*-кварка. Кстати, принадлежность кварка к *d*- или *u*-типу называется ароматом. [Глюон — от англ. glue (клей); *u* — от англ. up (наверху), *d* — от англ. down (внизу).— *Примеч. пер.*]

Глюоны, как и фотоны, еще пример частиц «со спином 1». Амплитуда попадания глюона из точки в точку определяется точно такой же формулой, что и для фотонов, *P*(*A*—*B*). Амплитуда излучения или поглощения глюонов кварками равна таинственному числу g, которое значительно превосходит *j* (см. рис. 81).

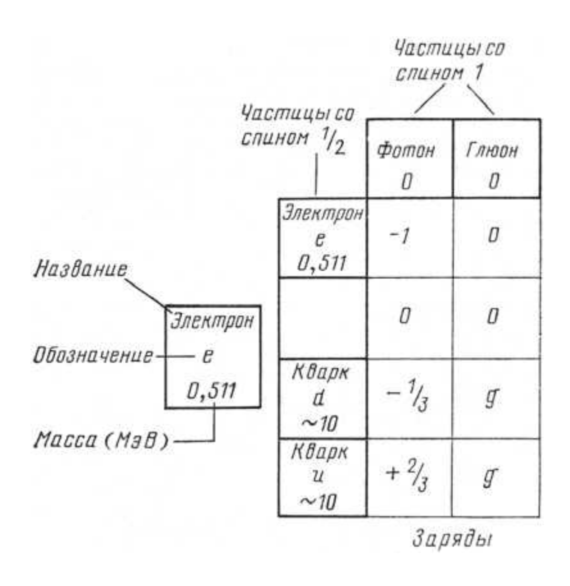


Рис. 81. «Глюоны» удерживают вместе кварки, составляющие протоны и нейтроны, и косвенно ответственны за притяжение протонов и нейтронов друг к другу в атомном ядре. Глюоны удерживают кварки силами, значительно превышающими электрические. Константа взаимодействия с глюонами g значительно превосходит j. Поэтому вычислять диаграммы глюонными взаимодействиями гораздо труднее, и наилучшая точность, на которую пока можно надеяться, не превышает 10 %

Диаграммы, изображающие обмен кварков глюонами, очень похожи на картинки, на которых мы изображали обмен электронов фотонами (см. рис. 82). Настолько похожи, что

вы можете сказать, что у физиков нет воображения — теория сильных взаимодействий просто копирует квантовую электродинамику! И вы правы: так и есть — но с некоторыми особенностями.

У кварков имеется добавочный тип поляризации, не связанный с геометрией. Простаки-физики, не способные возвыситься до изобретения прекрасных греческих слов, назвали этот тип поляризации неудачным словом «цвет». Этот «цвет» не имеет никакого отношения к цвету в обычном смысле. В данный момент времени кварк может находиться в одном из трех состояний, или «цветов» — К, З или С (догадываетесь, что означают эти сокращения?). При поглощении или испускании глюонов «цвет» кварка может измениться. Глюоны бывают восьми различных сортов, в зависимости от того, какие «цвета» они связывают. Например, если красный кварк становится зеленым, он испускает красно-антизеленый глюон — глюон, который забирает у кварка красный цвет и дает зеленый («антизеленый» означает, что глюон переносит



Рис. 82. Диаграмма, изображающая два кварка, которые обмениваются глюоном. Она настолько похожа на диаграмму для двух электронов, обменивающихся фотоном, что вы можете подумать, что физики просто скопировали квантовую электродинамику, строя теорию «сильных взаимодействий», удерживающих кварки внутри протонов и нейтронов. Да, так оно и есть — почти

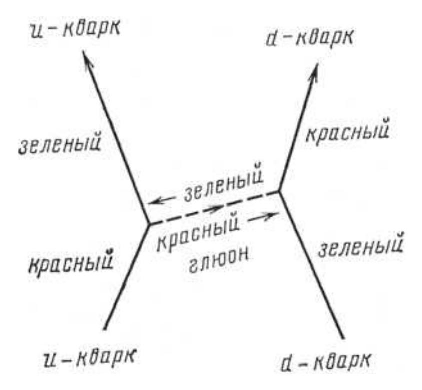


Рис. 83. Глюонная теория отличается от электродинамики тем, что глюоны взаимодействуют с «цветными» частицами (которые могут находиться в одном из трех возможных состояний — «красном», «зеленом» и «синем»). Здесь красный *u*-кварк превращается в зеленый, испуская красно-антизеленый глюон, поглощаемый затем зеленым кварком, который превращается в красный. (Если «цвет» переносится вспять во времени, к его названию добавляется приставка «анти»)

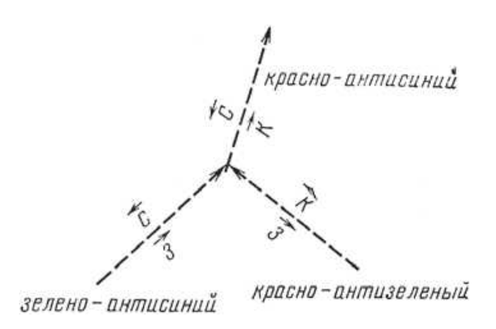


Рис. 84. Поскольку глюоны сами «окрашены», они могут взаимодействовать друг с другом. На рисунке показано, как зелено-антисиний глюон взаимодействует с красно-антизеленым и получается красно-антисиний глюон. Глюонную теорию легко понять — вы должны просто следить за «цветами»

зеленый цвет в противоположном направлении). Такой глюон может быть поглощен зеленым кварком, который станет после этого красным (см. рис. 83). Имеются восемь различных глюонов, например, красно-антикрасный, красно-антисиний, красно-антизеленый и т. д. (вы могли бы подумать, что их должно быть девять, но по техническим причинам один отсутствует). Теория не слишком сложная. Общее правило гласит: глюон взаимодействует с тем, что имеет «цвет»,— требуется лишь немного бухгалтерии, чтобы проследить, куда переносятся «цвета».

Это правило создает, однако, интересную возможность: глюоны могут взаимодействовать с другими глюонами (см. рис. 84). Например, зелено-антисиний глюон, встретившись с красно-антизеленым, превращается в красно-антисиний глюон. Глюонная теория очень проста — вы рисуете диаграмму и расставляете «цвета». Величины взаимодействий во всех диаграммах определяются глюонной константой связи g.

Формально глюонная теория не сильно отличается от квантовой электродинамики. Ну а как она соотносится с экспериментом? Например, как наблюдаемая величина магнитного момента протона соотносится с теоретической?

Эксперименты очень точны — они показывают, что магнитный момент равен 2,79275. Теория же дает в лучшем случае 2,7±0,3 — если вы достаточно оптимистично оцениваете точность своих расчетов. То есть погрешность равна 10 %, что в 10 000 раз ниже точности эксперимента! У нас имеется простая, четкая теория, которая должна объяснять все свойства протонов и нейтронов, но мы не можем ничего посчитать при помощи этой теории, потому что математика слишком сложна для нас. (Вы можете догадаться, над чем я работаю, но у меня ничего не получается.) Причина, по которой мы ничего не можем посчитать с приличной точностью, заключается в том, что константа связи для глюонов g значительно превосходит константу связи для электронов. Диаграммы с

двумя, четырьмя и даже шестью взаимодействиями не просто маленькие поправки к основной амплитуде — они вносят существенный вклад, которым нельзя пренебречь. Поэтому получается так много стрелок для различных вариантов, что мы не можем упорядочить их разумным образом и найти, чему равна результирующая стрелка.

В книгах говорится, что наука проста: вы строите теорию, сравниваете ее с экспериментом, и если теория не работает, вы ее отбрасываете и строите новую теорию. Здесь у нас есть четкая теория и сотни экспериментов, но мы не можем их сравнить! В истории физики такого положения еще не бывало. Мы временно оказались взаперти и не можем выбраться, пока не придумаем метод вычисления. Нас «завалило» всеми этими стрелочками, как снежным сугробом.

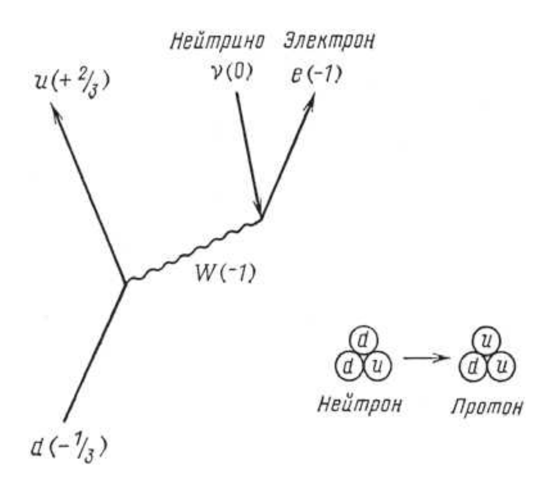


Рис. 85. Когда нейтрон превращается в протон (этот процесс называется бета-распадом), единственное, что изменяется — это «аромат» одного из кварков. *d*-кварк превращается в *u*-кварк, что сопровождается вылетом электрона и антинейтрино. Такой процесс происходит довольно медленно, поэтому предположили, что существует промежуточная частица (названная промежуточным *W*-бозоном) с очень большой массой (порядка 80 000 МэВ) и зарядом –1

Несмотря на сложности вычислений, мы качественно понимаем многое в квантовой хромодинамике (науке о сильных взаимодействиях кварков и глюонов). Наблюдаемые нами объекты, состоящие из кварков, «бесцветны»: группы из трех кварков содержат по одному кварку каждого «цвета», а кварк-антикварковые пары имеют одинаковую амплитуду быть красно-антикрасными, зелено-антизелеными или сине-антисиними. Мы также понимаем, почему кварки никогда не образуются по отдельности — почему мы видим (какой бы ни была энергия протона, ударяющегося о ядро), что вылетают не отдельные кварки, а струи мезонов и барионов (кварк-антикварковых пар и групп из трех кварков).

Квантовая хромодинамика и квантовая электродинамика — это еще не вся физика. Согласно этим теориям кварк не может изменить «аромат»: *u*-кварк всегда остается *u*-кварком, *d*-кварк всегда остается *d*-кварком. Но Природа иногда поступает по-другому. Существует медленная форма радиоактивности, бета-распад (утечки такой радиоактивности боятся на ядерных реакторах), при которой нейтрон превращается в протон. Поскольку нейтрон состоит из двух *d*-кварков и одного *u*-кварка, а протон — из двух *u*-кварков и одного *d*-кварка, то один из *d*-кварков нейтрона превращается в *u*-кварк (см. рис. 85). Вот как это происходит: *d*-кварк излучает новую частицу, *W*-бозон, подобную фотону, которая взаимодействует с электроном и другой новой частицей, антинейтрино (нейтрино, движущимся вспять во времени). Нейтрино — это еще одна частица со спином $^1/_2$ (как электрон и кварки), но оно не имеет массы и заряда (т. е. не взаимодействует с фотонами). Оно не взаимодействует также с глюонами, а только с *W*-бозонами (см. рис. 86).

W-бозон является частицей со спином 1 (как фотон и глюон), он изменяет «аромат» кварков и переносит их заряд: *d*-кварк с зарядом $-^1/_3$ превращается в *u*-кварк с зарядом $+^2/_3$ — разница зарядов равна −1. («Цвет» кварка при этом не

меняется.) Поскольку W^--бозон переносит заряд −1 (и его античастица W^+ переносит заряд +1), он взаимодействует также с фотонами. Бета-распад протекает гораздо медленнее, чем взаимодействие фотонов и электронов, поэтому считается, что W-бозон в отличие от фотона и глюона должен

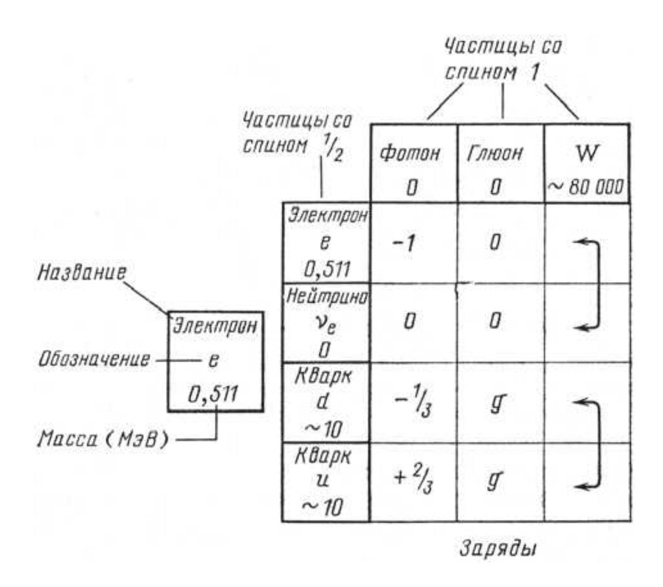


Рис. 86. С одной стороны, W-бозон взаимодействует с электроном и нейтрино, и с другой — с d-кварком и u-кварком

иметь очень большую массу (порядка 80 000 МэВ). Сам по себе W-бозон не наблюдается, поскольку для «выбивания» частицы с такой большой массой требуется очень большая энергия*.

---

* После прочтения этих лекций были достигнуты энергии, достаточно высокие для получения W-бозонов. Когда была измерена их масса, получилась величина, очень близкая к предсказанной теорией.

Есть и другая частица, которую можно считать нейтральным *W*-бозоном, она называется «Z^0-бозон». Z^0-бозон не меняет заряд кварка, но взаимодействует с *d*-кварком, *u*-кварком, электроном или нейтрино (см. рис. 87). Это взаимодействие носит вводящее в заблуждение название «нейтральные токи». Его открытие несколько лет назад вызвало большое волнение.

Теория *W*-бозонов строга и изящна, если вы учитываете трехчастичное взаимодействие между тремя типами *W*-бозонов (см. рис. 88). Наблюдаемая константа связи *W*-бозонов близка к электромагнитной: лежит в окрестности *j*. Поэтому

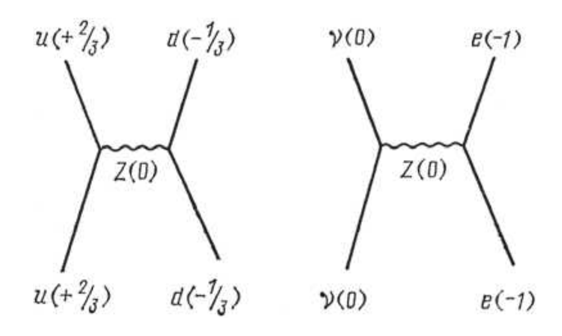


Рис. 87. Когда ни у одной из частиц заряд не меняется, *W*-бозон тоже не заряжен (он в этом случае называется Z^0-бозоном). Такие взаимодействия называются «нейтральными токами». Здесь показаны две возможности

не исключено, что три *W*-бозона и фотон являются разными сторонами одного явления. Стивен Вайнберг и Абдус Салам попробовали объединить в единую квантовую теорию квантовую электродинамику и так называемые «слабые взаимодействия» (взаимодействия через *W*-бозоны). И они это сделали. Но даже просто посмотрев на полученные ими результаты, вы, так сказать, увидите белые нитки. Совершенно очевидно, что фотон и три *W*-бозона каким-то образом свя-

заны, но на современном уровне понимания эта связь ясно не видна: все еще мешают «швы» в теориях. Их до сих пор не удалось разгладить и сделать эту связь красивее и, значит, наверное, правильнее.

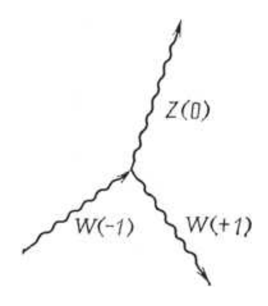


Рис. 88. Между W^{-}-, его античастицей W^{+}- и нейтральным W-бозоном (Z^{0}-бозоном) возможно взаимодействие. Константа связи для взаимодействия между W-бозонами лежит в окрестности j. На этом основано предположение, что W-бозоны и фотоны, возможно, представляют собой разные *стороны* одного и того же явления

Итак, квантовая теория описывает три основных типа взаимодействий: «сильное взаимодействие» кварков и глюонов, «слабое взаимодействие» W-бозонов и «электрическое взаимодействие» фотонов. Единственные имеющиеся (в соответствии с этой теорией) частицы — это кварки (с «ароматами» d и u, трех «цветов» каждый), глюоны (восемь комбинаций красного, зеленого и синего), W-бозоны (с зарядами ± 1 и 0), нейтрино, электроны и фотоны — примерно двадцать различных частиц шести различных типов (плюс их античастицы). Это не так уж плохо — примерно двадцать различных частиц — но только это еще не все.

По мере того как ядра бомбардировали протонами все более высоких энергий, продолжали возникать все новые частицы. Одной из таких частиц был мюон, в точности совпадающий с электроном во всех отношениях, за исключением значительно большей массы —105,8 МэВ. Это примерно в 206 раз превосходит массу электрона, равную 0,511 МэВ. Как будто Бог захотел попробовать для массы другое число! Все свойства мюона полностью описываются электродина-

мической теорией — та же константа связи j, та же $E(A—B)$, вы просто подставляете другое значение n*.

Так как мюон примерно в 200 раз тяжелее электрона, «стрелка часов» для мюона вращается в 200 раз быстрее, чем для электрона. Это позволило нам проверить, продолжает ли квантовая электродинамика соответствовать эксперименту на расстояниях, в 200 раз меньших, чем те, на которых мы могли проверить ее до сих пор. Хотя эти расстояния все еще более чем в 10^{80} раз превосходят такие, на которых теорию подстерегают неприятности из-за бесконечностей (см. сноску на с. 146).

Мы уже знаем, что электрон может взаимодействовать с *W*-бозоном (см. рис. 85). При превращении *d*-кварка в *u*-кварк с испусканием *W*-бозона может ли *W*-бозон взаимодействовать с мюоном вместо электрона? Да (см. рис. 90). А антинейтрино? Если *W*-бозон взаимодействует с мюоном, частица, которая называется мюонным нейтрино, занимает место обычного нейтрино (которое мы теперь будем называть электронным нейтрино). Поэтому теперь в нашей таблице частиц вслед за электроном и нейтрино по-

---

* Магнитный момент мюона был измерен очень точно — он оказался равным 1,001165924 (с погрешностью около 9 в последнем знаке), тогда как для электрона это число равно 1,00115965221 (с погрешностью около 3 в последнем знаке). Вы можете заинтересоваться, почему магнитный момент мюона немного больше, чем магнитный момент электрона. На одной из нарисованных нами диаграмм был электрон, излучающий фотон, который распадался на электрон-позитронную пару (см. рис. 89). Существует также малая амплитуда того, что фотон распадается на мюон-антимюонную пару, которая тяжелее, чем исходный электрон. Эта ситуация несимметрична: когда мюон излучает фотон, распадающийся на электрон-позитронную пару, последняя *легче,* чем исходный мюон. Квантовая электродинамика точно описывает *все* электрические свойства как мюонов, так и электронов.

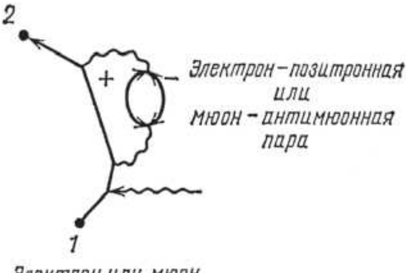


Рис. 89. При бомбардировке ядра протонами все более и более высокой энергии возникают новые частицы. Одна из них — мюон, или тяжелый электрон. Мюонные взаимодействия описываются той же теорией, что и электронные, с той только разницей, что вы просто подставляете большее значение для *n* в формулу *E*(*A*—*B*). Магнитный момент мюона должен несколько отличаться от магнитного момента электрона, поскольку, когда электрон излучает фотон, который затем распадается на электрон-позитронную или мюон-антимюонную пару, массы частиц пары равны или превышают массу электрона. С другой стороны, когда *мюон* излучает фотон, распадающийся на позитрон-электронную или мюон-антимюонную пару, массы частиц пары не превышают массу мюона. Это небольшое различие подтверждается экспериментами

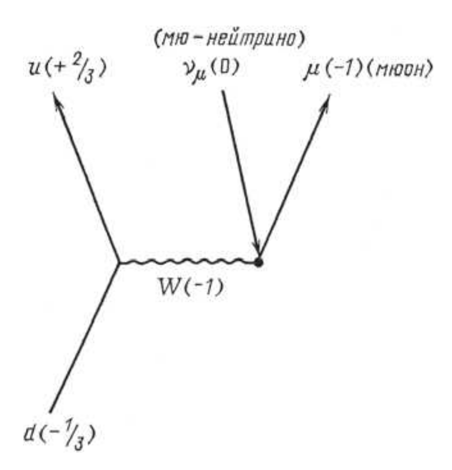


Рис. 90. У *W*-бозона имеется амплитуда излучения мюона вместо электрона. В этом случае место электронного нейтрино занимает мюонное нейтрино

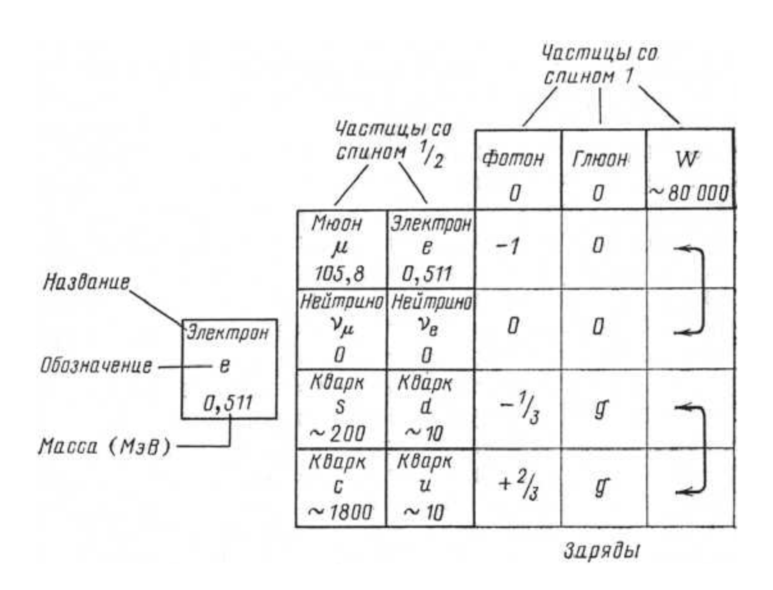


Рис. 91. Природа как бы повторяет частицы со спином $^1/_2$. Кроме мюона и мю-нейтрино, имеются два новых кварка — *s* и *c* — с такими же зарядами, но массами большими, чем у их двойников в следующем столбце

являются две дополнительные частицы; мюон и мюонное нейтрино.

А кварки? Уже очень давно известны частицы, которые должны состоять из более тяжелых кварков, чем *u* и *d*. Поэтому в список фундаментальных частиц был включен третий кварк, названный *s*-кварком (от strange — странный). Масса *s*-кварка равна примерно 200 МэВ (сравните с 10 МэВ в случае *u*- и *d*-кварков).

Много лет мы считали, что у кварков есть только три «аромата» — *u, d* и *s,* но в 1974 г. была открыта новая частица, названная пси-мезоном, которую не удалось составить из этих трех кварков. Имелся очень хороший теоретический аргумент, что должен существовать четвертый кварк, взаимодействующий с *s*-кварком при участии *W*-бозона так же,

как *u*-кварк взаимодействует с *d*-кварком (см. рис. 91). «Аромат» этого кварка называется *c*, и у меня не хватит смелости объяснить, что означает *c,* но, возможно, вы читали об этом*. Названия становятся все хуже и хуже!

Это появление частиц с повторяющимися свойствами, но с возрастающими массами — совершенно таинственно. Что значит это странное дублирование образцов? Как сказал профессор Исидор Раби, когда был открыт мюон: «Кто заказал это?»

В последнее время началось новое повторение списка. По мере перехода ко все более высоким энергиям начинает казаться, что Природа продолжает нагромождать эти частицы как бы с целью нас одурманить. Я должен рассказать вам о них, так как я хочу, чтобы вы увидели, каким сложным в действительности выглядит мир. Я ввел бы вас в заблуждение, создав впечатление, что если 99 % явлений в мире можно объяснить при помощи электронов и фотонов, то оставшийся 1 % явлений потребует только 1 % дополнительных частиц! На самом деле чтобы объяснить этот оставшийся 1 %, нам потребуется в десять или в двадцать раз больше дополнительных частиц.

Итак, продолжаем: при экспериментах с еще большими энергиями был обнаружен еще более тяжелый электрон, названный «тау», с массой порядка 1800 МэВ, как у двух протонов! Было сделано предположение о существовании тау-нейтрино. Кроме того, была обнаружена забавная частица, предполагающая существование кварка нового «аромата» — на сей раз это *b*-кварк (от beauty — прелесть), его заряд равен $-{}^{1}/_{3}$ (см. рис. 92). Теперь я предлагаю вам стать на мгновение первоклассными физиками-теоретиками и сделать одно предсказание: будет открыт новый аромат кварков, называемый ___-кварком (от «___»), с зарядом ___ и

---

* *c* — от charm (очарование) — *Примеч. пер.*

массой ___ МэВ, — мы, конечно, надеемся, что он *действительно* есть!*

Частицы со спином 1

Частицы со спином $^1/_2$

			Фотон 0	Глюон 0	W ~ 80 000
Тау τ ~ 1860	Мюон μ 105,8	Электрон e 0,511	−1	0	
Нейтрино ν_τ 0	Нейтрино ν_μ 0	Нейтрино ν_e 0	0	0	
Кварк b ~ 4800	Кварк s ~ 200	Кварк d ~ 10	$-^1/_3$	g	
	Кварк c ~ 1800	Кварк u ~ 10	$+^2/_3$	g	

Заряды

Название

Обозначение

Электрон e 0,511

Масса (МэВ)

Рис. 92. Итак, продолжаем! При еще более высоких энергиях началось новое повторение частиц со спином $^1/_2$. Оно станет полным, если будет открыта частица со свойствами, означающими существование кварка нового аромата. Тем временем ведется подготовка к поискам нового повторения при еще более высоких энергиях. Что вызывает эти повторения — совершенно неизвестно

Тем временем ставятся эксперименты с целью посмотреть, не повторится ли цикл еще раз. В настоящее время построены машины для поисков еще более тяжелого электрона, чем тау. Если масса предполагаемой частицы равна

* После того как были прочитаны эти лекции, появились некоторые свидетельства в пользу существования очень тяжелого *t*-кварка — с массой порядка 40 000 МэВ. [И зарядом $+^2/_3$. *t* — от top (вершина) или truth (истина). Фейнман обыгрывает это, используя слово «действительно» (true). Упоминаемые Фейнманом свидетельства впоследствии не подтвердились.— *Примеч. пер.*].

100 000 МэВ, они не смогут ее создать. Если порядка 40 000 МэВ, такая частица может быть создана.

Тайны, вроде этих повторяющихся циклов, делают работу физика-теоретика очень интересной: Природа задает нам такие чудесные загадки! Почему она повторяет электрон частицами, массы которых в 206 и 3640 раз больше?

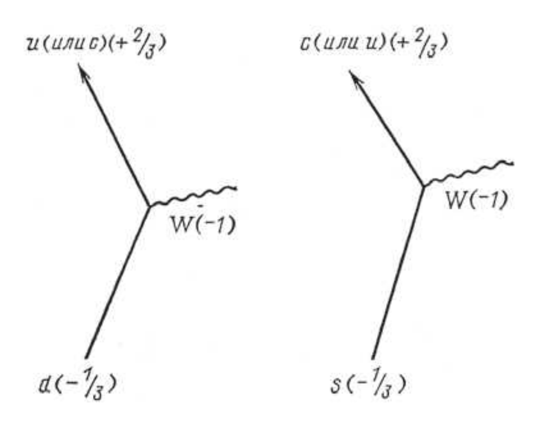


Рис. 93. У *d*-кварка имеется небольшая амплитуда превращения вместо *u*-кварка в *c*-кварк, и у *s*-кварка имеется небольшая амплитуда превращения вместо *c*-кварка в *u*-кварк, причем в обоих случаях будет испускаться *W*-бозон. Мы видим, что *W*-бозон способен менять кварковый аромат из одного столбца таблицы в другой (см. рис. 92)

Мне хотелось бы сделать одно последнее замечание, чтобы совершенно покончить с частицами. Когда, взаимодействуя с *W*-бозоном, *d*-кварк переходит в *u*-кварк, он может также с небольшой амплитудой перейти вместо этого в *c*-кварк. Когда *u*-кварк переходит в *d*-кварк, он может также с малой амплитудой перейти в *s*-кварк и с еще меньшей амплитудой перейти в *b*-кварк (см. рис. 93). Поэтому *W*-бозон немного все перекашивает и позволяет кваркам переходить из одного столбца таблицы в другой. Почему возникают в такой пропорции амплитуды перехода в другие типы кварков, совершенно неизвестно.

Вот и все, что касается остальной квантовой физики. Это чудовищная неразбериха, и вы можете сказать, что физика безнадежно запуталась. Но так казалось всегда. Природа всегда казалась безнадежно запутанной, но продвигаясь вперед, мы различаем закономерности и сводим теории воедино; возникает какая-то ясность и все становится проще. Неразбериха, которую я вам сейчас продемонстрировал, значительно меньше, чем та, что была десять лет назад, когда мне пришлось бы рассказывать вам о четырехстах с лишним частицах. А подумайте о неразберихе в начале этого века, когда независимо существовали тепло, магнетизм, электричество, свет, рентгеновское и ультрафиолетовое излучения, показатели преломления, коэффициенты отражения и другие свойства различных веществ, которые мы с тех пор объединили в одну теорию — квантовую электродинамику.

Я хотел бы подчеркнуть одно обстоятельство. Теории, посвященные остальной физике, очень похожи на квантовую электродинамику: все они описывают взаимодействие объектов со спином $^1/_2$ (вроде электронов и кварков) с объектами, имеющими спин 1 (вроде фотонов, глюонов и W-бозонов), в рамках концепции амплитуд, согласно которой вероятность события равна квадрату длины стрелки. Почему все физические теории имеют столь сходную структуру?

Имеется несколько возможностей. Во-первых, причиной может служить ограниченное воображение физиков, встретившись с новым явлением, мы пытаемся вогнать его в уже имеющиеся рамки — и только поставив достаточное количество экспериментов, обнаруживаем, что концы с концами не сходятся. Поэтому, если какой-нибудь дурак-физик во время лекции в Калифорнийском университете в 1983 г. говорит: «Вот так все устроено, и посмотрите, как удивительно похожи теории», это не значит, что в Природе все *на самом деле* так похоже, а значит, что физики только и были способны повторять одно и то же снова и снова.

Другая возможность состоит в том, что это на самом деле все одно и то же, что у Природы есть только один способ выражаться, и потому время от времени Она повторяет свой рассказ.

Третья возможность состоит в том, что все похожие явления — это на самом деле разные стороны одной и той же скрытой от нас большой картины, части которой, взятые по отдельности, кажутся разными, как пальцы на одной руке. Многие физики трудятся над созданием великой картины, объединяющей все в одну сверхсупермодель. Это восхитительная игра, но в настоящее время игроки никак не договорятся о том, что представляет собой эта великая картина. Я лишь немного преувеличу, если скажу, что в большинстве этих спекулятивных теорий не больше глубокого смысла, чем в вашем предсказании *t*-кварка, и я гарантирую, что они предсказывают массу *t*-кварка ничуть не лучше вас!

Например, кажется, что электроны, нейтрино, *d*-кварк и *u*-кварк чем-то похожи — действительно, как два первых, так и два вторых взаимодействуют с *W*-бозоном. В настоящее время считается, что кварк может менять только «цвет» и «аромат». Но, возможно, он способен превратиться в нейтрино, провзаимодействовав с какой-то неизвестной частицей. Хорошая идея. Что тогда будет? Это будет означать, что протоны нестабильны.

Кто-то придумывает теорию: протон нестабилен. Проводятся вычисления, которые показывают, что во Вселенной больше не будет протонов! Тогда начинают подгонять числа, повышают массу новой частицы и после больших усилий предсказывают, что протон будет жить чуть дольше, чем время, за которое, судя по последним экспериментальным данным, он не распадается.

Когда появляется новый эксперимент и проводятся более тщательные исследования протона, то, чтобы вывернуться, теориям приходится приспосабливаться. Самые последние эксперименты показали, что протон живет по крайней мере в пять раз дольше, чем могла допустить теория. И что, вы ду-

маете, произошло? Феникс опять воскрес, с новой модификацией теории, которая требует еще более точной экспериментальной проверки. Распадается или не распадается протон, неизвестно. Доказать, что он не распадается, очень трудно.

Во всех этих лекциях я не обсуждал гравитацию. Причина этого заключается в *крайней* малости гравитационного взаимодействия между объектами: соответствующая сила между двумя электронами в 1 с 40 нулями раз слабее электрической (возможно, с 41 нулем). В веществе почти все электрические силы тратятся на удержание электронов вблизи ядра их атома, что создает точно уравновешенную смесь «плюсов» и «минусов». Но в случае гравитации имеется только сила притяжения и она накапливается и накапливается по мере увеличения числа атомов, пока, наконец, дойдя до таких грандиозно больших масс, как наши собственные, мы не получаем возможность измерять действие гравитации — на планеты, на нас и т. д.

Из-за того что гравитационная сила настолько слабее всех других взаимодействий, в настоящее время невозможно провести эксперимент, достаточно тонкий, чтобы измерить какой-нибудь эффект, для объяснения которого потребовалась бы точность квантовой теории гравитации*. И хотя нет способа экспериментальной проверки, существуют тем не менее квантовые теории гравитации, содержащие «гравитоны» (принадлежащие к новому типу поляризации, со спином 2) и другие фундаментальные частицы (некоторые со спином $^3/_2$). Даже лучшая из этих теорий не может охватить всех тех частиц, которые мы находим, а изобретает множество частиц, которых мы не находим. Квантовые теории гравитации также имеют бесконечности в диаграммах со взаимодействиями, но «дурац-

* Когда Эйнштейн и другие пытались объединить гравитацию с электродинамикой, обе теории были классическими приближениями. Другими словами, они были неправильны. Ни одна из этих теорий не содержала концепции амплитуд, которую мы сегодня считаем столь необходимой.

кий прием», который позволяет избавиться от них в квантовой электродинамике, в случае гравитации не помогает. Поэтому у нас нет не только экспериментов для проверки квантовой теории гравитации, у нас нет также и разумной теории.

Во всем этом рассказе осталась одна особенно неудовлетворительная черта: не существует теории, адекватно объясняющей величины наблюдаемых масс частиц, *m*. Мы пользуемся этими числами во всех наших теориях, но не понимаем их — что они собой представляют или откуда они берутся. Я считаю, что с фундаментальной точки зрения это очень интересная и важная проблема.

Прошу извинить меня, если все эти размышления о новых частицах вас запутали, но я решил сделать более полным рассказ об остальной физике, чтобы показать вам, что *характер* законов — концепция амплитуд, диаграммы, которые изображают подлежащие вычислению взаимодействия, и т. д. — тот же, что и в квантовой электродинамике — нашем лучшем примере хорошей теории.

Примечание, сделанное при чтении корректуры в ноябре 1984 г.

С тех пор, как были прочитаны эти лекции, экспериментально обнаружены подозрительные события, делающие вероятным скорое открытие чего-то совершенно нового и неожиданного (и потому не упомянутого в этих лекциях). Это может быть еще одна частица или какое-то иное явление.

Примечание, сделанное при чтении корректуры в апреле 1985 г.

К данному моменту вышеупомянутые «подозрительные события» оказались ложной тревогой. Ситуация, несомненно, снова изменится к тому времени, когда вы будете читать эту книгу. В физике изменения происходят быстрее, чем в книгоиздательском деле.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

СОДЕРЖАНИЕ

Научно-популярное издание

Фейнман Ричард

КЭД — СТРАННАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА И ВЕЩЕСТВА

Технический редактор *Т.В. Полонская*

Общероссийский классификатор продукции
ОК-034-2014 (КПЕС 2008); 58.11.1 — книги, брошюры печатные

Произведено в Российской Федерации

Изготовлено в 2018 г.

Изготовитель: ООО «Издательство АСТ»

ООО «Издательство АСТ»
129085, г. Москва, Звёздный бульвар, дом 21, строение 1, комната 705, пом. I, 7 этаж.
Наш электронный адрес: **www.ast.ru**
E-mail: neoclassic@ast.ru
ВКонтакте: vk.com/ast_neoclassic

«Баспа Аста» деген ООО
129085, Мәскеу қ., Звёздный бульвары, 21-үй, 1-құрылыс, 705-бөлме, I жай, 7-қабат.
Біздің электрондық мекенжайымыз: www.ast.ru
E-mail: neoclassic@ast.ru

Интернет-магазин: www.book24.kz
Интернет-дүкен: www.book24.kz
Импортёр в Республику Казахстан ТОО «РДЦ-Алматы».
Қазақстан Республикасындағы импорттаушы «РДЦ-Алматы» ЖШС.
Дистрибьютор и представитель по приему претензий на продукцию в Республике Казахстан:
ТОО «РДЦ-Алматы»

Қазақстан Республикасында дистрибьютор
және өнім бойынша арыз-талаптарды қабылдаушының
өкілі «РДЦ-Алматы» ЖШС, Алматы қ., Домбровский көш., 3«а», литер Б, офис 1.
Тел.: 8(727) 2 51 59 89,90,91,92, факс: 8 (727) 251 58 12 вн. 107;
E-mail: RDC-Almaty@eksmo.kz
Өнімнің жарамдылық мерзімі шектелмеген.

Өндірген мемлекет: Ресей
Сертификация қарастырылмаған

Подписано в печать 02.11.2018. Формат 84x108 1/32.
Гарнитура Newton. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,08.
Тираж экз. Заказ




ISBN 978-5-17-112577-6



Ричард Фейнман (1918—1988) — выдающийся американский физик, удостоенный Нобелевской премии по квантовой электродинамике, один из создателей атомной бомбы, автор знаменитого курса лекций, который стал настольной книгой для каждого, кто открывает для себя потрясающий мир физики.

В основу этой книги легли знаменитые лекции Ричарда Фейнмана, прочитанные им в Калифорнийском университете.

В этих лекциях прославленный физик рассказывает о квантовой электродинамике – теории, в создании которой принимал участие он сам, – рассказывает простым и доступным языком, понятным даже самому обычному читателю.

Не зря даже о самом первом, принстонском издании «КЭД» критики писали: «Книга, которая полностью передает захватывающий и остроумный стиль Фейнмана, сделавшего квантовую электродинамику не только понятной, но и занимательной».

Гениальная книга. Фейнман умеет сделать науку понятной для самого неподготовленного читателя!

«Times Literary Supplement»

Фейнман всегда оригинален и остроумен, хочет он того или нет!

«New Yorker»

ISBN 978-5-17-112577-6





www.ast.ru